



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΕΣ ΣΠΟΥΔΕΣ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ (ΠΣΦ)

Διπλωματική Εργασία

**Η Συμμετρία CPT στη Σωματιδιακή Φυσική και στην
Κοσμολογία**

Γιώργος Κουνδουράκης

Επιβλέπων Καθηγητής: Αλέξανδρος Κεχαγιάς

Πάτρα, Μάιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Γιώργου Κουνδουράκη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο 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 και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Η Συμμετρία CPT στη Σωματιδιακή Φυσική και στην Κοσμολογία

Γιώργος Κουνδουράκης

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Αλέξανδρος Κεχαγιάς Καθηγητής ΣΕΜΦΕ	Συν-Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Παπαδόπουλος Διευθυντής Ερευνών ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος
---	---

Πάτρα, Μάιος 2026

Η προσπάθεια να κατανοήσουμε το σύμπαν είναι ένα από τα πολύ λίγα πράγματα που υψώνουν την ανθρώπινη ζωή λίγο πάνω από το επίπεδο μιας φάρσας και της προσδίδουν κάτι από τη χάρη μιας τραγωδίας.

Steven Weinberg (1933 - 2021)

Από την επίπονη έρευνά μου, με τις πολλές σκοτεινές ατραπούς της, γνωρίζω πόσο δύσκολο είναι να κάνει κανένας ένα σωστό βήμα, έστω και πολύ μικρό, στο δρόμο που οδηγεί στην κατανόηση του τι είναι πραγματικά σημαντικό.

Albert Einstein (1879 - 1955)

Μπορώ να ζήσω με την αμφιβολία και την αβεβαιότητα και το να μη γνωρίζω. Νομίζω ότι είναι πολύ πιο ενδιαφέρον να ζεις χωρίς να γνωρίζεις, παρά να έχεις απαντήσεις που μπορεί να είναι λάθος. Δεν νιώθω τρομαγμένος από το να είμαι χαμένος σε ένα μυστηριώδες σύμπαν χωρίς κανέναν σκοπό, που είναι η πραγματικότητα από όσο μπορώ να καταλάβω. Δεν με τρομάζει.

Richard Feynman (1918 - 1988)

Στον Πατέρα μου Δημήτρη και στη Μητέρα μου Μαρία

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ- ΣΗΜΕΙΩΜΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές Αλέξανδρο Κεχαγιά και Κωνσταντίνο Παπαδόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσαν να ασχοληθώ με αυτό που πάντα αγαπούσα και συνεχίζω να αγαπάω, την Κοσμογονία. Είτε σε φιλοσοφικό είτε σε επιστημονικό επίπεδο. Η παρούσα προσέγγιση και οι εναλλακτικές ερμηνείες οι οποίες παρουσιάζονται εδώ, θεωρώ ότι είναι πολύ ενδιαφέρουσες ακόμα και αν αποδειχθούν αναληθείς ή χρειάζεται να αναθεωρηθούν στο μέλλον. Ούτως ή άλλως η κινητήριος δύναμη της επιστήμης πηγάζει από τη δυναμική της εξέλιξης που εμφανίζει, μέσα από τη συνεχή βελτίωση των μοντέλων και των θεωριών της, προς μία καλύτερη και ασυμπτωτική προσέγγιση κατανόησης της συμπαντικής πραγματικότητας.

Μάρτιος 2026

Γιώργος Κουνδουράκης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Η Συμμετρία CPT στη Σωματιδιακή Φυσική και στην Κοσμολογία

Περίληψη	9
Abstract.....	11
1. Εισαγωγή.....	12
1.1 Σκοτεινή ύλη και Σκοτεινή Ενέργεια: Οι μεγαλύτεροι γρίφοι της Κοσμολογίας του 21 ^{ου} αιώνα.....	12
1.2 Κοσμολογία και Γενική Σχετικότητα - Από τις Εξισώσεις του Αϊνστάιν στις εξισώσεις Friedmann.....	13
1.3 Ποια η σημασία των συμμετριών στη φυσική; Νόμοι διατήρησης.....	16
2. Οι Συμμετρίες C, P, T και το Θεώρημα CPT.....	18
2.1 Η Συμμετρία C (Charge Conjugation - Συζυγία Φορτίου).....	18
2.2 Η Συμμετρία P (Parity - Ισοτιμία).....	19
2.3 Η Συμμετρία T (Time Reversal - Αντιστροφή Χρόνου).....	20
2.4 Το Θεώρημα CPT και η Παραβίαση CP.....	21
3. Η CPT συμμετρία ως «κλειδί» ερμηνείας της Κοσμολογικής δημιουργίας και εξέλιξης.....	24
3.1 Η απουσία του Κοσμολογικού Πληθωρισμού στο CPT συμμετρικό μοντέλο.....	24
3.2 Μία νέα ερμηνεία βαρυονικής ασυμμετρίας μέσω του CPT-Συμμετρικού Σύμπαντος.....	28
3.3 Μία «οικονομική» εξήγηση της κοσμολογικής σκοτεινής ύλης.....	34
3.4 Συσχέτιση με το ισχυρό CP πρόβλημα και το «βέλος» του χρόνου.....	38
3.5 Το πείραμα ANITA και οι ενδείξεις για την ύπαρξη του συμμετρικού CPT σύμπαντος.....	41
4. Το Πείραμα Alpha-g και η προτεινόμενη αναθεώρηση του CPT συμμετρικού μοντέλου.....	45
4.1 Η άπωση ύλης και αντιύλης στη θεωρία της CPT βαρύτητας ως υποψήφιος της επιταχυνόμενης κοσμολογικής διαστολής.....	45

4.2 Το πείραμα ALPHA-g και η φαινομενική απόρριψη του ισχυρισμού της άπωσης ύλης-αντιύλης.....	49
4.3 Δύο (ή τέσσερις) πιθανές λύσεις στο πρόβλημα της κοσμολογικής άπωσης ύλης-αντιύλης.....	53
5. Συμπεράσματα – Επίλογος.....	57
6. Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	60
7. Παραρτήματα.....	65
Παράρτημα Α: Ο σύμμορφος χρόνος στη σύγχρονη κοσμολογία.....	65
Παράρτημα Β: Υπόθεση καμπυλότητας Weyl.....	67
Παράρτημα Γ: Ο μηχανισμός seesaw (μηχανισμός «τραμπάλας»).....	70
Παράρτημα Δ: Ο μηχανισμός σφαλερονίων (sphaleron mechanism).....	73
Παράρτημα Ε: Νετρίνα Majorana.....	78

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τον ρόλο της συμμετρίας CPT (Charge Conjugation, Parity, Time Reversal) ως θεμελιώδη πυλώνα για την κατανόηση του Σύμπαντος, συνδέοντας τη σωματιδιακή φυσική με τη σύγχρονη κοσμολογία. Η μελέτη ξεκινά με την ανάλυση των συμμετριών και του θεωρήματος της Noether, καταδεικνύοντας πώς οι νόμοι διατήρησης αποτελούν τον οργανωτικό σκελετό της φυσικής.

Κεντρικό σημείο της εργασίας αποτελεί το μοντέλο του «CPT-Συμμετρικού Σύμπαντος» (των Boyle, Finn, Turok), το οποίο προτείνει ότι η Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang) δεν είναι μια αυθόρμητη παραβίαση συμμετρίας, αλλά ένα σημείο ανάκλασης. Σε αυτό το πλαίσιο, το αντι-Σύμπαν, πριν τη Μεγάλη Έκρηξη, αποτελεί το CPT-είδωλο του δικού μας, εξελισσόμενο αντίστροφα στον χρόνο και κυριαρχούμενο από αντιύλη. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει μια κομψή και «οικονομική» εξήγηση για τη σκοτεινή ύλη μέσω της ύπαρξης ενός σταθερού, δεξιόστροφου στείρου νετρίνου (Majorana), εξαλείφοντας την ανάγκη για θεωρίες κοσμολογικού πληθωρισμού.

Επιπλέον, εξετάζονται πειραματικά δεδομένα από την αποστολή ANITA, τα οποία ανίχνευσαν «ανοδικά» σωματίδια υψηλής ενέργειας που θα μπορούσαν να ερμηνευθούν ως διασπάσεις σωματιδίων σκοτεινής ύλης παγιδευμένων στο εσωτερικό της Γης.

Τέλος, η εργασία αναλύει τα αποτελέσματα του πειράματος ALPHA-g στο CERN σχετικά με τη βαρυτική συμπεριφορά της αντιύλης και τις προτεινόμενες αναθεωρήσεις του Villata για την απωστική βαρύτητα ως εναλλακτική της σκοτεινής ενέργειας. Η κύρια πρόταση του συγγραφέα/ερευνητή είναι ότι, ενώ η ύλη έλκει την ύλη και η αντιύλη έλκει την αντιύλη, η ύλη και η αντιύλη, ίσως, απωθούνται βαρυτικά σε απομονωμένες νησίδες στο δικό μας σύμπαν ή/και τα κοσμολογικά κατοπτρικά συμπαντικά «φύλλα» αισθάνονται αμοιβαία βαρυτική άπωση.

Συμπερασματικά, η CPT συμμετρία αναδεικνύεται σε κλειδί για την επίλυση των αινιγμάτων της «σκοτεινής πλευράς» του Κόσμου.

Λέξεις - Κλειδιά

Συμμετρία CPT (CPT Symmetry), CPT-Συμμετρικό Σύμπαν (CPT-Symmetric Universe), Σκοτεινή Ύλη (Dark Matter), Σκοτεινή Ενέργεια (Dark Energy), Αντιβαρύτητα (Antigravity), Στείρα Νετρίνα (Sterile Neutrinos), Σωματίδια Majorana (Majorana Particles), Μεγάλη Έκρηξη/Σημείο Ανάκλασης (Big Bang/Reflection Point), Πείραμα ANITA (ANITA Experiment), Πείραμα ALPHA-g (ALPHA-g Experiment)

Abstract

This master's thesis explores the role of CPT symmetry (Charge Conjugation, Parity, and Time Reversal) as a fundamental pillar for understanding the Universe, bridging the gap between particle physics and modern cosmology. The study begins with an analysis of symmetries and Noether's theorem, demonstrating how conservation laws constitute the organizing framework of physics.

A central subject of this work is the "CPT-Symmetric Universe" model (of Boyle, Finn, and Turok), which proposes that the Big Bang is not a spontaneous symmetry violation but rather a reflection point. Within this framework, the anti-universe prior to the Big Bang is the CPT-image of our own, evolving backwards in time and dominated by antimatter. This approach offers an elegant and "economical" explanation for dark matter through the existence of a stable, right-handed sterile neutrino (Majorana), potentially eliminating the need for cosmic inflation theories.

Furthermore, experimental data from the ANITA mission are examined, which detected "upward-going" high-energy particles that could be interpreted as decays of dark matter particles trapped within the Earth's interior.

Finally, this thesis analyzes the results of the ALPHA-g experiment at CERN regarding the gravitational behavior of antimatter, alongside Villata's proposed revisions concerning repulsive gravity as an alternative to dark energy. Researcher's primary proposition is that while matter attracts matter and antimatter attracts antimatter, matter and antimatter might gravitationally repel each other in isolated islands within our universe, and/or the cosmological mirror spacetime "sheets" may experience mutual gravitational repulsion.

In conclusion, CPT symmetry emerges as a key to resolving the enigmas of the "dark side" of the Cosmos.

Keywords

CPT Symmetry, CPT-Symmetric Universe, Dark Matter, Dark Energy, Antigravity, Sterile Neutrinos, Majorana Particles, Big Bang / Reflection Point, ANITA Experiment, ALPHA-g Experiment

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φυσική, στον πυρήνα της, είναι η αναζήτηση της κατανόησης των θεμελιωδών νόμων που διέπουν το Σύμπαν. Κατά τον 20ο αιώνα, δύο επαναστατικές θεωρίες, η Γενική Σχετικότητα και η Κβαντική Μηχανική, έθεσαν τα θεμέλια για μια άνευ προηγουμένου πρόοδο. Ωστόσο, καθώς προχωράμε βαθύτερα στον 21ο αιώνα, η ίδια η επιτυχία αυτών των θεωριών έχει αποκαλύψει αρκετά κενά στη γνώση μας. Το Σύμπαν, όπως το γνωρίζουμε σήμερα, είναι κατά 95% άγνωστο, κυριαρχούμενο από δύο μυστηριώδεις οντότητες: τη Σκοτεινή Ύλη και τη Σκοτεινή Ενέργεια (Amendola & Tsujikawa, 2010). Παράλληλα, η βαθύτερη κατανόηση της κοσμικής δυναμικής και της δομής της ύλης παραμένει άρρηκτα συνδεδεμένη με την έννοια της συμμετρίας, τη σιωπηλή αρχή που υπαγορεύει τους νόμους διατήρησης του Σύμπαντος (Greene, 2024). Η διασύνδεση αυτών των τριών θεματικών —των αινιγμάτων της σκοτεινής πλευράς του Κόσμου, των κοσμολογικών συνεπειών της Γενικής Σχετικότητας και του ρόλου των Συμμετριών— συνιστά το πιο γοητευτικό και δύσκολο πεδίο έρευνας της σύγχρονης φυσικής (Tyson, 2024).

1.1 Σκοτεινή Ύλη και Σκοτεινή Ενέργεια: Οι μεγαλύτεροι γρίφοι της Κοσμολογίας του 21^{ου} αιώνα

Η Σκοτεινή Ύλη (Dark Matter, DM) και η Σκοτεινή Ενέργεια (Dark Energy, DE) αποτελούν τα δύο πλέον μυστηριώδη συστατικά του Σύμπαντος, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 95% της συνολικής πυκνότητας μάζας-ενέργειας. Η ύπαρξή τους εξάγεται έμμεσα από τις βαρυτικές τους επιδράσεις στις παρατηρούμενες δομές και τη δυναμική της συμπαντικής εξέλιξης (Bertone & Hooper, 2018). Το Καθιερωμένο Πρότυπο της Κοσμολογίας (Λ CDM μοντέλο) τις ενσωματώνει ως απαραίτητα συστατικά για την εξήγηση κοσμολογικών παρατηρήσεων όπως: την ταχύτητα περιστροφής των γαλαξιακών δομών, τους βαρυτικούς φακούς, την Κοσμική Ακτινοβολία Μικροκυμάτων (Cosmic Microwave Background, CMB) και την επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος (Perlmutter et al., 1999; Riess et al., 1998). Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα παρατηρησιακά δεδομένα -

ενδεικτικά αναφέρουμε την αποστολή Planck- το σύμπαν αποτελείται κατά προσέγγιση από 4.9% συνήθη βαρυονική ύλη, 26.8% Σκοτεινή Ύλη και 68.3% Σκοτεινή Ενέργεια (Mack, 2020; Planck Collaboration, 2020).

Η Σκοτεινή Ύλη αποκαλύφθηκε για πρώτη φορά μέσω των βαρυτικών της επιδράσεων. Ο αστρονόμος Fritz Zwicky, τη δεκαετία του 1930, παρατήρησε ότι οι ταχύτητες των γαλαξιών στα γαλαξιακά σμήνη ήταν πολύ υψηλότερες από ό,τι θα επέτρεπε η μάζα της ορατής ύλης (Zwicky, 1937). Αργότερα, η Vera Rubin, τη δεκαετία του 1970, επιβεβαίωσε ότι οι καμπύλες περιστροφής των σπειροειδών γαλαξιών παρέμεναν σχεδόν επίπεδες στα εξωτερικά τους άκρα, αντί να μειώνονται όπως προβλέπεται από τη Νευτώνεια μηχανική (Rubin & Ford, 1970; Rubin et al., 1980).

Αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη ενός τεράστιου, αόρατου φωτοστέφανου (halo) ύλης που παρέχει την επιπλέον βαρυτική έλξη (Binney & Tremaine, 2008). Η Σκοτεινή Ύλη δεν εκπέμπει, δεν απορροφά, ούτε ανακλά φως ή οποιαδήποτε άλλη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η φύση της παραμένει άγνωστη, με τους υποψήφιους να κυμαίνονται από τα WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) έως τα αξιόνια (Milgrom, 1983).

1.2 Κοσμολογία και Γενική Σχετικότητα - Από τις εξισώσεις του Αϊνστάιν στις εξισώσεις Friedmann.

Η σύγχρονη κοσμολογία εδράζεται στη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, η οποία περιγράφει τη βαρύτητα ως την καμπυλότητα του χωροχρόνου που προκαλείται από την παρουσία ενέργειας και ύλης (Einstein, 1916). Περιγράφει την διαστολή και τη δυναμική εξέλιξη του Σύμπαντος (Αντωνίου, 2025). Τα μαθηματικά που απαιτούνται για να εισάγουμε τη Σκοτεινή Ύλη και τη Σκοτεινή Ενέργεια, προέρχονται κυρίως από την Κοσμολογία FLRW (Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker), η οποία αποτελεί το βασικό πλαίσιο για την περιγραφή του Λ CDM Προτύπου (Αντωνίου, 2025; Kolb & Turner, 1990). Τα κοσμολογικά μοντέλα που αναφέρονται σε αυτήν θεωρούνται ομογενή και ισότροπα. Ας δούμε τις βασικές τους εξισώσεις.

Οι εξισώσεις πεδίου του Αϊνστάιν δίνονται από την παρακάτω μαθηματική έκφραση:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1.1)$$

Σύμφωνα με τον Wheeler (1990), ο χωρόχρονος είναι το «σκηνικό» και ταυτόχρονα ο «πρωταγωνιστής»· η ύλη υπαγορεύει στο χώρο πώς να καμπυλωθεί και ο χώρος με τη σειρά του υπαγορεύει στην ύλη πώς να κινηθεί. Οι παραπάνω εξισώσεις πεδίου αποτελούν ένα σύστημα 16 εξισώσεων (λόγω της συμμετρίας των τανυστών $T_{\mu\nu}$ και $R_{\mu\nu}$, οι εξισώσεις περιορίζονται σε 10). Δεν θα αναλύσουμε περαιτέρω τη σημασία και την χρήση των παραπάνω συμβόλων (θεωρούμε ότι αυτή αναλύεται ικανοποιητικά στην παρατιθέμενη βιβλιογραφία). Θα προχωρήσουμε με τις εξισώσεις που χρειαζόμαστε για να περιγράψουμε το Λ CDM μοντέλο στη σύγχρονη κοσμολογία.

Όπως τονίσαμε, για ένα σύμπαν που είναι ομογενές και ισότροπο, η γεωμετρία περιγράφεται από τη μετρική Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (Carroll, 2004):

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right] \quad (1.2)$$

Η μετρική αυτή αποτελεί το μαθηματικό πλαίσιο που επιτρέπει στον παράγοντα κλίμακας $a(t)$ να περιγράψει την ιστορία της διαστολής του σύμπαντος (Ryden, 2017). Συνδυάζοντας τη μετρική FLRW με τις εξισώσεις Einstein, προκύπτουν οι δύο εξισώσεις Friedmann. Ωστόσο, για να είναι το σύστημα πλήρες, απαιτείται και μία εξίσωση συνέχειας (ή ρευστού), η οποία εξασφαλίζει τη διατήρηση της ενέργειας (Liddle, 2015).

Η εξίσωση που περιγράφει πώς ο ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος σχετίζεται με την πυκνότητά του και τη γεωμετρία του είναι η **πρώτη εξίσωση Friedmann** (ή εξίσωση ρυθμού) στην Κοσμολογία:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho(t) - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad (1.3)$$

- Η «σταθερά» Hubble H , η οποία ορίζεται ως $H \equiv \dot{a}/a$ με τον a να είναι ο παράγοντας κλίμακας (scale factor) του Σύμπαντος (δείχνει πόσο «μεγάλο» είναι το σύμπαν σε σχέση με την τωρινή του κατάσταση), ο οποίος περιγράφει τη σχετική διαστολή του

χώρου και $\dot{\alpha}$ να είναι ο ρυθμός με τον οποίο αλλάζει ο παράγοντας κλίμακας. Η εξίσωση αυτή συνδέει το ρυθμό διαστολής του σύμπαντος, μέσω της σταθερά του Hubble, με την καμπυλότητα του χωρικού τμήματος (όρος με το k) και τη συνολική πυκνότητα $\rho(t)$ [η συνολική ενεργειακή πυκνότητα του σύμπαντος $\rho(t)$ περιλαμβάνει όλες τις συνιστώσες: $\rho = \rho_{\text{rad}} + \rho_{\text{matter}} + \rho_{\Lambda}$, όπου η ρ_{rad} αντιστοιχεί στην πυκνότητα ακτινοβολίας, η ρ_{matter} εκφράζει την κανονική (βαρυονική) ύλη και τη σκοτεινή ύλη και η ρ_{Λ} είναι η ενεργειακή πυκνότητα της σκοτεινής ενέργειας]. Αποτελεί τη θεμελιώδη δυναμική σχέση της κοσμολογίας, διότι καθορίζει με ποιο τρόπο εξελίσσεται ο παράγοντας κλίμακας $\alpha(t)$ υπό την επίδραση της υλο-ενέργειας και της γεωμετρίας του χώρου. Όπως παρατηρούμε στη συγκεκριμένη εξίσωση, αλλά και σε αυτές που προηγήθηκαν ή θα ακολουθήσουν, υπάρχει ο όρος που περιλαμβάνει τη σταθερά Λ (το μεγαλύτερο «λάθος» του Αϊνστάιν).

Με την παρουσίαση της **δεύτερης εξίσωσης Friedmann**, θα καταλάβουμε τη δυναμική της σημασία στην κοσμολογική εξέλιξη. Η εξίσωση αυτή είναι:

$$\left(\frac{\ddot{\alpha}}{\alpha}\right)^2 = -\frac{4\pi G}{3c^2}(3P(t) + \rho(t)c^2) + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad (1.4)$$

Η εξίσωση αυτή εκφράζει το ρυθμό επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης της διαστολής του σύμπαντος. Δείχνει ότι η παρουσία της πίεσης $P(t)$ και της πυκνότητας $\rho(t)$, τείνουν να επιβραδύνουν την κοσμολογική διαστολή, καθώς και οι δύο συνεισφέρουν με αρνητικό πρόσημο στον όρο $\ddot{\alpha}/\alpha$ (Αντωνίου, 2025). Ο τελευταίος όρος, και στις δύο εξισώσεις 1.3 και 1.4, εκφράζει τη συνεισφορά της αποκαλούμενης σκοτεινής ενέργειας. Η συνεισφορά αυτή είναι θετική και δημιουργεί μία απωστική δύναμη (αρνητική πίεση) συμπαντικής διαστολής.

Ένα ρευστό, όμως, χαρακτηρίζεται από δύο βασικά μεγέθη: την πίεση P και την πυκνότητα ρ . Οπότε, το παραπάνω σύστημα των δύο εξισώσεων πλαισιώνεται από μία **τρίτη εξίσωση** που θα συνδέει την πίεση $P(t)$ και την πυκνότητα ενέργειας $\rho(t)$, μέσω μίας σταθεράς αναλογίας w :

$$P(t) = w\rho(t)c^2, \text{ όπου } w = 0, w = \frac{1}{3}, w = -1 \quad (1.5)$$

Η παράμετρος w καθορίζει το «είδος» του κοσμικού ρευστού. Για $w=0$ η εξίσωση είναι τετριμμένη και αναφέρεται σε ύλη η οποία δεν δημιουργεί πίεση (π.χ. σκόνη, ψυχρή σκοτεινή ύλη), για $w=1/3$ περιγράφει τη δυναμική της πίεσης μέσω ακτινοβολίας ή φωτονίων και για $w=-1$ αντιστοιχεί στην περίπτωση της κοσμολογικής σταθεράς ή όπως προαναφέραμε, στο κοσμολογικό μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει τη σκοτεινή ενέργεια.

Σε συνδυασμό με τις δύο πρώτες εξισώσεις του Friedmann, η εξίσωση 1.5 κλείνει το σύστημα και καθορίζει τη χρονική εξέλιξη του παράγοντα κλίμακας $a(t)$ για κάθε μορφή ύλης και ενέργειας (Αντωνίου, 2025; Kolb & Turner, 1990).

Αν θέλουμε να κατανοήσουμε με ποιο τρόπο η ενέργεια κατανέμεται σε ένα συνεχώς διαστελλόμενο σύμπαν, δεν έχουμε παρά να συνδυάσουμε τις τρεις εξισώσεις Friedmann και θα πάρουμε την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} \left(\rho(t) + \frac{P}{c^2} \right) = 0 \quad (1.6)$$

Αυτή η εξίσωση είναι ο «νόμος της κοσμικής οικονομίας». Μας λέει ότι η μεταβολή της ενέργειας σε έναν όγκο οφείλεται τόσο στην αύξηση του ίδιου του όγκου όσο και στο έργο που παράγει η πίεση κατά τη διαστολή (Ryden, 2017). Είναι η απόδειξη ότι στο σύμπαν τίποτα δεν χάνεται, απλώς μετασχηματίζεται καθώς ο ιστός του χώρου τεντώνει.

1.3 Ποια η σημασία των συμμετριών στη φυσική; Νόμοι διατήρησης.

Τόσο η Γενική Σχετικότητα όσο και η Κβαντική Μηχανική οικοδομούνται πάνω στην έννοια της συμμετρίας. Στη φυσική, η συμμετρία δεν αναφέρεται μόνο στην οπτική ισορροπία, αλλά σε ένα αναλλοίωτο μετασχηματισμό: μια ιδιότητα ενός συστήματος ή ενός νόμου που παραμένουν αμετάβλητα κάτω από μία συγκεκριμένη αλλαγή.

Η σημασία των συμμετριών στη φυσική είναι θεμελιώδης, καθώς αποτελούν τον οργανωτικό σκελετό των φυσικών νόμων. Ο βαθύτερος λόγος για αυτή τη σημασία αποκαλύφθηκε από τη μαθηματικό Emmy Noether (1915). Το Θεώρημα της Noether είναι μια από τις πιο κομψές και ισχυρές δηλώσεις της σύγχρονης φυσικής: *Για κάθε συνεχή συμμετρία ενός φυσικού συστήματος, υπάρχει ένας αντίστοιχος νόμος διατήρησης.* Η αναλλοίωτη στο χρόνο (time translation symmetry), δηλαδή το

γεγονός ότι οι νόμοι της φυσικής είναι οι ίδιοι σήμερα και θα είναι οι ίδιοι και αύριο, συνεπάγεται τη διατήρηση της ενέργειας. Η αναλλοίωτη στη χωρική μετατόπιση (spatial translation symmetry), δηλαδή το γεγονός ότι οι νόμοι της φυσικής είναι οι ίδιοι εδώ και θα είναι οι ίδιοι και στο διπλανό δωμάτιο (ομογένεια του χώρου), συνεπάγεται τη διατήρηση της ορμής. Η αναλλοίωτη στη χωρική περιστροφή (spatial rotation symmetry), δηλαδή το γεγονός ότι οι νόμοι της φυσικής είναι ίδιοι προς κάθε κατεύθυνση (ισοτροπία του χώρου), συνεπάγεται τη διατήρηση της στροφορμής. Στο πλαίσιο των θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων (ηλεκτρομαγνητική, ασθενής, ισχυρή), οι Συμμετρίες Βαθμίδας (Gauge Symmetries) είναι αυτές που υπαγορεύουν την ύπαρξη των ίδιων των δυνάμεων. Οι νόμοι του Καθιερωμένου Προτύπου (Standard Model) προκύπτουν από την απαίτηση για αναλλοιωτότητα κάτω από τις τοπικές ομάδες μετασχηματισμού βαθμίδας $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$.

Η αναζήτηση μιας «Θεωρίας των Πάντων» συχνά μεταφράζεται στην αναζήτηση μιας μεγαλύτερης συμμετρίας (Grand Unified Theory - GUT) που θα ενοποιούσε όλες τις δυνάμεις. Ωστόσο, οι συμμετρίες δεν είναι πάντα εμφανείς. Η αυθόρμητη ρήξη συμμετρίας (spontaneous symmetry breaking), όπως αυτή που περιγράφεται από τον Μηχανισμό Higgs, εξηγεί γιατί τα σωματίδια απέκτησαν μάζα, αν και οι θεμελιώδεις νόμοι τους ήταν αρχικά συμμετρικοί. Οι συμμετρίες, οι διατηρήσεις και οι ρήξεις τους αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του τωρινού Κοσμολογικού μοντέλου (το Λ CDM και τις παραλλαγές του) και του μοντέλου της Κβαντικής Θεωρίας Πεδίου (QFT), το οποίο περιγράφει το τρόπο δόμησης του Καθιερωμένου Προτύπου (Standard Model) (Amendola & Tsujikawa, 2010; Tyson, 2024).

Στη συνέχεια θα μιλήσουμε για τις συμμετρίες C, P, και T (και συνδυασμού τους), οι οποίες είναι θεμελιώδεις συμμετρίες με εφαρμογή στις φυσικές αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων και της ύλης (Lee & Yang, 1956; Wu et al., 1957). Αποτελούν τη βάση του Θεωρήματος CPT, του βασικότερου θεωρήματος της Κβαντικής Θεωρίας Πεδίου (QFT) που προαναφέραμε (Christenson et al., 1964; Lüders, 1957).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Οι Συμμετρίες C, P, T και το Θεώρημα CPT

Οι συμμετρίες C, P, και T αποτελούν τους πυλώνες των φυσικών νόμων που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις των στοιχειωδών σωματιδίων. Η συνδυασμένη δράση τους κωδικοποιείται στο Θεώρημα CPT, το οποίο θεωρείται ακρογωνιαίος λίθος της Κβαντικής Θεωρίας Πεδίου (QFT) (Streater & Wightman, 1964).

2.1 Η Συμμετρία C (Charge Conjugation - Συζυγία Φορτίου)

Η συμμετρία C αφορά τον μετασχηματισμό όπου ένα σωματίδιο αντικαθίσταται από το αντισωματίδιό του. Κατά τη διαδικασία αυτή, αντιστρέφονται όλα τα εσωτερικά κβαντικά φορτία, όπως το ηλεκτρικό φορτίο (Q), ο βαρυονικός (B) και ο λεπτονικός αριθμός (L), ενώ η μάζα και το σπιν παραμένουν αναλλοίωτα (Griffiths, 2008).

Πιο συγκεκριμένα η συμμετρία C είναι ο μετασχηματισμός που ανταλλάσσει κάθε σωματίδιο με το αντισωματίδιό του, διατηρώντας όμως τη μάζα, την ορμή και το σπιν αναλλοίωτα. Η αναπαράσταση της δράσης του στα κβαντικά πεδία δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{C}\Phi\hat{C}^{-1} = n_c\Phi^\dagger \quad (2.1)$$

Εδώ, το $\Phi^\dagger$ αναπαριστά το αντι-πεδίο. Όπως σημειώνει ο Weinberg (1995), η συμμετρία αυτή αντιστρέφει όλα τα εσωτερικά κβαντικά φορτία, όπως το ηλεκτρικό φορτίο Q, τον βαρυονικό αριθμό B και τον λεπτονικό αριθμό L. Ο τελεστής $\hat{C}$ δρα στους τελεστές καταστάσεων (τελεστές δημιουργίας και καταστροφής) ως εξής:

$$\hat{C}\hat{a}^\dagger(p,s)\hat{C}^{-1} = \hat{b}^\dagger(p,s) \quad (2.2)$$

Αυτό σημαίνει ότι η δημιουργία ενός σωματιδίου (τελεστής $a^\dagger$) μετατρέπεται στη δημιουργία ενός αντισωματιδίου (τελεστής $b^\dagger$) με την ίδια ορμή p και σπιν s.

Ενώ η Ηλεκτρομαγνητική και η Ισχυρή αλληλεπίδραση διατηρούν τη συμμετρία C, η Ασθενής αλληλεπίδραση την παραβιάζει, καθώς τα νετρίνα εμφανίζονται στη φύση μόνο με συγκεκριμένη ελικτικότητα (Martin & Shaw, 2017). Συγκεκριμένα, στη φύση

υπάρχουν μόνο αριστερόστροφα νετρίνα. Εφαρμόζοντας τον τελεστή $\hat{C}$, θα έπρεπε να προκύψει ένα αριστερόστροφο αντινεutrino. Όμως, τα αντινεutrino στη φύση είναι πάντα δεξιόστροφα. Συνεπώς, η συμμετρία C δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις των στοιχειωδών αλληλεπιδράσεων (Griffiths, 2008).

2.2 Η Συμμετρία P (Parity - Ισοτιμία)

Η συμμετρία P αφορά τον χωρικό μετασχηματισμό της ανάκλασης ως προς την αρχή των αξόνων, δηλαδή (x, y, z) σε $(-x, -y, -z)$. Ο μετασχηματισμός αυτός αλλάζει το πρόσημο των πολικών διανυσμάτων (π.χ. ορμή), αλλά αφήνει ανεπηρέαστα τα αξονικά διανύσματα όπως το σπιν (Perkins, 2000). Η ιστορική ανακάλυψη της παραβίασης της ισοτιμίας προτάθηκε από τους Lee και Yang (1956) και επιβεβαιώθηκε πειραματικά από την C. S. Wu (1957) μέσω της παρατήρησης της ασύμμετρης εκπομπής ηλεκτρονίων στη διάσπαση βήτα του πυρήνα Κοβαλτίου-60.

Όταν ο τελεστής $\hat{P}$ δρα σε ένα πεδίο Φ , το αποτέλεσμα εξαρτάται από την εγγενή ισοτιμία (n_p) του σωματιδίου.

$$\hat{P}\Phi(t, r)\hat{P}^{-1} = n_p\Phi(t, -r) \quad (2.3)$$

Τα βαθμωτά πεδία (scalars) έχουν $n_p=+1$ (π.χ. το μποζόνιο Higgs). Τα ψευδοβαθμωτά (pseudoscalars) έχουν $n_p=-1$. Τα πόνια είναι κλασικό παράδειγμα· αν και συμπεριφέρονται ως βαθμωτά στην περιστροφή, αλλάζουν πρόσημο στην ανάκλαση. Τα διανυσματικά (vectors), όπως το φωτόνιο, έχουν $n_p=-1$ καθώς το ηλεκτρικό πεδίο $\vec{E}$ αλλάζει φορά στην ανάκλαση.

Μέχρι το 1956, η φυσική κοινότητα πίστευε ότι η P είναι μία απόλυτη συμμετρία. Ωστόσο, οι Lee και Yang (1956) πρότειναν (και η Wu απέδειξε πειραματικά) ότι η Ασθενής Πυρηνική Αλληλεπίδραση παραβιάζει την P , όπως προαναφέραμε. Στο Καθιερωμένο Πρότυπο, η ασθενής δύναμη «βλέπει» μόνο τα αριστερόστροφα φερμιόνια. Η παρουσία του πίνακα γ^5 στη Λαγκρανζιανή της ασθενούς αλληλεπίδρασης ($\bar{\psi}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\psi$) μαθηματικά εγγυάται ότι η φύση διακρίνει το «αριστερά» από το «δεξιά».

2.3 Η Συμμετρία T (Time Reversal - Αντιστροφή Χρόνου)

Η συμμετρία T περιγράφει την αναλλοiotήτα των φυσικών νόμων υπό την αντικατάσταση του χρόνου t με $-t$. Στο πλαίσιο αυτό, ένα σωματίδιο φαίνεται να «κινείται προς τα πίσω» στον χρόνο, αντιστρέφοντας την ορμή και τη στροφορμή του (Sakurai & Napolitano, 2017).

Αν και διαισθητικά φαίνεται απλή, μαθηματικά είναι η πιο περίπλοκη. Η δράση του $\hat{T}$ στο χωροχρόνο και την ορμή γίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\hat{T}(t, r) \rightarrow \hat{T}(-t, r) \quad (2.4)$$

Επειδή η ορμή ορίζεται ως $\vec{p} = m \cdot d\vec{r}/dt$, η αντιστροφή του dt συνεπάγεται ότι η ορμή αλλάζει φορά: $\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$. Ομοίως, η στροφορμή και το σπιν αντιστρέφονται.

Η ανάγκη ο τελεστής αντιστροφής του χρόνου $\hat{T}$ να είναι αντιγραμμικός (anti-linear) δεν είναι απλώς ένα μαθηματικό τέχνασμα, αλλά μια φυσική αναγκαιότητα για τη σταθερότητα της ύλης. Ας το δούμε λίγο πιο αναλυτικά.

Στην κβαντομηχανική, θέλουμε ο τελεστής $\hat{T}$ να διατηρεί τις θεμελιώδεις σχέσεις μετάθεσης. Η βασική σχέση είναι:

$$[x, p] = i\hbar \quad (2.5)$$

Αν εφαρμόσουμε τον $\hat{T}$ σε αυτή τη σχέση το x μένει x και το p γίνεται $-p$. Άρα το αριστερό μέλος γίνεται $[x, -p] = -i\hbar$. Για να ισχύει η ισότητα, πρέπει και το δεξί μέλος $i\hbar$ να αλλάξει πρόσημο. Επειδή το $\hbar$ είναι σταθερά, ο μόνος τρόπος να γίνει αυτό είναι μέσω της μιγαδικής συζυγίας: $i \rightarrow -i$. Αυτό ακριβώς κάνει ένας αντιγραμμικός τελεστής. Ας υποθέσουμε ότι ο $\hat{T}$ ήταν ένας απλός γραμμικός τελεστής. Στην κβαντομηχανική, η χρονική εξέλιξη καθορίζεται από τον τελεστή $U = e^{-iHt/\hbar}$. Αν ο $\hat{T}$ αντιστρέφει το χρόνο, θα έπρεπε να ισχύει:

$$\hat{T}e^{-iHt/\hbar}\hat{T}^{-1} = e^{-iH(-t)/\hbar} = e^{iHt/\hbar} \quad (2.6)$$

Αν ο $\hat{T}$ ήταν γραμμικός, θα μπορούσαμε να τον «περάσουμε» μέσα από το εκθετικό χωρίς να πειράξουμε το i . Τότε η παραπάνω σχέση θα απαιτούσε:

$$\hat{T}(-iH)\hat{T}^{-1} \rightarrow -i(\hat{T}H\hat{T}^{-1}) = iH \rightarrow \hat{T}H\hat{T}^{-1} = -H \quad (2.7)$$

Οι συνέπειες αυτού θα ήταν καταστροφικές. Αν το αποτέλεσμα της 2.7 ίσχυε, τότε για κάθε ιδιοκατάσταση $|E\rangle$ με θετική ενέργεια E , θα υπήρχε μια κατάσταση $\hat{T}|E\rangle$ με ενέργεια $-E$. Το φάσμα της ενέργειας δεν θα είχε κάτω φράγμα (θα εκτεινόταν μέχρι το $-\infty$). Ένα σύστημα θα μπορούσε να εκπέμπει άπειρη ενέργεια μεταπηδώντας σε όλο και πιο αρνητικές στάθμες. Το σύμπαν θα κατέρρεε ακαριαία!

Επομένως, η λύση είναι η αντιγραμμικότητα του $\hat{T}$. Επαναλαμβάνοντας την πράξη στο εκθετικό:

$$\hat{T}e^{-iHt/\hbar}\hat{T}^{-1} = e^{+i(\hat{T}H\hat{T}^{-1})t/\hbar} = e^{iHt/\hbar} \quad (2.8)$$

Για να ισούται αυτό με το $e^{iHt/\hbar}$ (που είναι η σωστή χρονική αντιστροφή), πρέπει τώρα:

$$\hat{T}H\hat{T}^{-1} = +H \quad (2.9)$$

Με την αντιγραμμικότητα, η ενέργεια παραμένει θετική και το σύστημα σταθερό. Ο $\hat{T}$ αλλάζει την κίνηση (ορμή, στροφορμή) αλλά όχι το περιεχόμενο της ενέργειας. Δηλαδή, σε αντίθεση με τους $\hat{C}$ και $\hat{P}$, ο $\hat{T}$ είναι αντιμοναδιαίος (anti-unitary) και αντιγραμμικός. Ο Sakurai τονίζει ότι η αντιγραμμικότητα του $\hat{T}$ είναι ο λόγος που στην κβαντομηχανική δεν μπορούμε να έχουμε έναν απλό μοναδιαίο τελεστή για το χρόνο, όπως έχουμε για τις μετατοπίσεις στο χώρο.

Η άμεση παρατήρηση της παραβίασης της συμμετρίας T (χωρίς την επίκληση της CPT) επιτεύχθηκε στα τέλη του 20^{ου} αιώνα από το πείραμα CPLEAR (Angelopoulos et al., 1998).

2.4 Το Θεώρημα CPT και η Παραβίαση CP

Το Θεώρημα CPT δηλώνει ότι κάθε τοπική κβαντική θεωρία πεδίου που είναι αναλλοίωτη κατά Lorentz πρέπει να είναι συμμετρική υπό τον συνδυασμένο μετασχηματισμό $C \times P \times T$ (Lüders, 1954). Αυτό συνεπάγεται ότι τα σωματίδια και τα αντισωματίδια πρέπει να έχουν ταυτόσημες μάζες και χρόνους ζωής. Ωστόσο, η συνδυασμένη συμμετρία CP (συζυγία φορτίου και ισοτιμία) δεν είναι απόλυτη. Η

παραβίαση της CP ανακαλύφθηκε από τους Christenson, Cronin, Fitch και Turley (1964) κατά τη μελέτη των ουδέτερων καονίων. Η παραβίαση αυτή έχει θεμελιώδη σημασία, καθώς, λόγω του θεωρήματος CPT, η παραβίαση της CP συνεπάγεται αναγκαστικά και την παραβίαση της T. Ταυτόχρονα, αποτελεί μία από τις τρεις συνθήκες Sakharov (1967) για την εξήγηση της επικράτησης της ύλης έναντι της αντιύλης στο σύμπαν (βαριογένεση).

Το θεώρημα CPT είναι ένας από τους πιο θεμελιώδεις πυλώνες της σύγχρονης φυσικής. Δηλώνει ότι κάθε τοπική κβαντική θεωρία πεδίου που είναι Lorentz αναλλοίωτη πρέπει να υπακούει στη συνδυασμένη συμμετρία $\hat{\theta} = \hat{C}\hat{P}\hat{T}$. Οι προϋποθέσεις ισχύος του θεωρήματος, σύμφωνα με τους Streater και Wightman (1964), είναι: η θεωρία να είναι τοπική (locality), να υπάρχει Lorentz αναλλοιοτότητα και να ισχύει η σύνδεση σπιν-στατιστικής (τα φερμιόνια έχουν ημιακέραιο σπιν). Το θεώρημα CPT εγγυάται ότι: τα σωματίδια και τα αντισωματίδια έχουν ακριβώς την ίδια μάζα, έχουν τον ίδιο χρόνο ζωής κατά τη δημιουργία τους και έχουν αντίθετες μαγνητικές ροπές αλλά με ίδιο μέτρο.

Πρόσφατες έρευνες επεκτείνουν και προτείνουν την εφαρμογή της CPT από το επίπεδο των σωματιδίων στη συνολική δομή του σύμπαντος. Σύμφωνα με τη θεωρία του «CPT-Συμμετρικού Σύμπαντος», η Μεγάλη Έκρηξη δεν αποτελεί μόνο την αρχή του δικού μας κόσμου, αλλά το σημείο από το οποίο αναδύεται ένα ζεύγος συμπάντων: το δικό μας και το είδωλό του (anti-universe), το οποίο κυριαρχείται από αντιύλη και εξελίσσεται αντίστροφα στον χρόνο, διατηρώντας τη συνολική συμμετρία CPT. Αυτό το μοντέλο προσφέρει μια κομψή εξήγηση για τη σκοτεινή ύλη, προτείνοντας την ύπαρξη ενός σταθερού, δεξιόστροφου στείρου νετρίνου με μάζα $4.8 \cdot 10^8$ GeV (Boyle et al., 2018). Αυτή η κοσμολογική προσέγγιση υποστηρίζεται από θεωρίες που βλέπουν τη Μεγάλη Έκρηξη ως σημείο διακλάδωσης δύο «πεπλεγμένων» (entangled) συμπάντων μέσα σε ένα κενό de Sitter (Fiscaletti et al., 2021). Στο πειραματικό πεδίο, η θεωρία αυτή θα μπορούσε να σχετίζεται με τα ασυνήθιστα «ανοδικά» συμβάντα που ανίχνευσε η αποστολή ANITA στην Ανταρκτική, τα οποία μπορούν να ερμηνευθούν είτε ως διασπάσεις ημι-σταθερών σωματιδίων σκοτεινής ύλης στο εσωτερικό της Γης (Anchordoqui et al., 2018), είτε ως αποτέλεσμα υπερσυμμετρικών μεταβάσεων τύπου «σφαλερονίου» (sphaleron transitions) που προκαλούνται από κοσμικά νετρίνα (Anchordoqui & Antoniadis,

2019). Παράλληλα, η επέκταση της CPT συμμετρίας στη βαρύτητα (CPT gravity) εισηγείται τη βαρυτική άπωση μεταξύ ύλης και αντιύλης ως εναλλακτική της σκοτεινής ενέργειας. Τα πρόσφατα –φαινομενικά αντιφατικά– αποτελέσματα του πειράματος ALPHA-g, που έδειξαν βαρυτική έλξη για το αντιυδρογόνο, αναγκάζουν τη θεωρία να αναζητήσει λύσεις όπου η άπωση προκύπτει από την αλληλεπίδραση με έναν ανεστραμμένο χωροχρόνο και όχι απαραίτητα από την αντιύλη εντός του δικού μας χωροχρόνου (Villata, 2024).

Στη συνέχεια της μελέτης μας θα αναλύσουμε, τόσο αυτές τις κοσμολογικές προτάσεις σε σχέση με την CPT συμμετρία, όσο και τις εναλλακτικές θεωρίες που προτείνουν για τη βαρύτητα και τη συμπεριφορά της ύλης σε επίπεδο στοιχειωδών σωματιδίων. Όλα αυτά θα συζητηθούν στα πλαίσια των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το δύο προαναφερόμενα πειράματα.

Κεφάλαιο 3

Η CPT συμμετρία ως «κλειδί» ερμηνείας της Κοσμολογικής δημιουργίας και εξέλιξης

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει το μοντέλο του CPT-συμμετρικού σύμπαντος, το οποίο προτείνει ότι η Μεγάλη Έκρηξη δεν αποτελεί μια αυθόρμητη παραβίαση της συμμετρίας αυτής, αλλά ένα σημείο ανάκλασης όπου το σύμπαν πριν από το Big Bang είναι η εικόνα CPT του δικού μας σύμπαντος. Μέσα από αυτή την προσέγγιση, επιχειρείται η επίλυση θεμελιωδών προβλημάτων της κοσμολογίας, όπως η βαρυονική ασυμμετρία και η φύση της σκοτεινής ύλης, χωρίς την ανάγκη προσθήκης νέων πεδίων πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο (Boyle et al., 2018; Boyle et al., 2022).

3.1 Η απουσία του Κοσμολογικού Πληθωρισμού στο CPT συμμετρικό μοντέλο

Η κυριαρχία της ύλης έναντι της αντιύλης στο παρατηρήσιμο σύμπαν αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα άλυτα προβλήματα της σύγχρονης φυσικής. Η συμβατική κοσμολογία βασίζεται στις συνθήκες του Sakharov για να εξηγήσει τη βαρυογένεση, απαιτώντας παραβίαση του βαρυονικού αριθμού (B), παραβίαση των συμμετριών C και CP, και συνθήκες εκτός θερμικής ισορροπίας. Ωστόσο, το μοντέλο του CPT-Συμμετρικού Σύμπαντος (Boyle et al., 2018; Boyle et al., 2022; Anchordoqui et al., 2018) προτείνει μια ριζικά διαφορετική οδό: το σύμπαν δεν παραβιάζει τη συμμετρία CPT αυθόρμητα, αλλά αποτελεί το ίδιο μια CPT-αναλλοίωτη οντότητα όπου ο χρόνος εκτείνεται αμφίδρομα από το σημείο της Μεγάλης Έκρηξης (στο σύμπαν μας και σε ένα κατοπτρικά πανομοιότυπο).

Στο μοντέλο αυτό, η χωροχρονική μετρική Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) ορίζεται ως:

$$ds^2 = \alpha^2(\tau)[-d\tau^2 + d\vec{x}^2] \quad (3.1)$$

όπου τ είναι ο σύμμορφος χρόνος (conformal time)¹. Η θεμελιώδης υπόθεση των Boyle, Finn και Turok (2018) είναι ότι ο παράγοντας κλίμακας $\alpha(\tau)$ πρέπει να υπακούει, μέσω κατάλληλης μαθηματικής συνάρτησης, στη σχέση:

$$\alpha(-\tau) = -\alpha(\tau) \quad (3.2)$$

Στο μοντέλο του CPT-Symmetric Universe, η Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang) δεν θεωρείται η αρχή του χρόνου, αλλά ένα σημείο ανάκλασης (mirror point). Το «κλειδί» για να αποφύγουν τον κοσμικό πληθωρισμό (inflation) είναι η παραδοχή ότι το σύμπαν κυριαρχείται από ακτινοβολία κοντά στο $\tau = 0$.

Η συγκεκριμένη μαθηματική μορφή που προτείνουν, για τον παράγοντα κλίμακας κοντά στο σημείο μηδέν, είναι:

$$\alpha(\tau)^2 = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \tau^n \quad (3.3)$$

Οι συντελεστές c_n δεν είναι αυθαίρετοι αριθμοί, αλλά καθορίζονται από το ενεργειακό περιεχόμενο του σύμπαντος κοντά στο Big Bang. Επειδή η υπόθεση εργασίας είναι ότι το σύμπαν κυριαρχείται από ακτινοβολία στο πρώιμο στάδιο, οι συντελεστές προκύπτουν από τις εξισώσεις Friedmann.

Στην πλήρη ανάλυση των Boyle, Finn και Turok, οι συντελεστές c_n , στο παραπάνω ανάπτυγμα, προκύπτουν από την αντικατάσταση της σειράς Taylor στις εξισώσεις Friedmann. Αν θεωρήσουμε την εξίσωση Friedmann με την παρουσία ακτινοβολίας, ύλης και κοσμολογικής σταθεράς (και χωρικής καμπυλότητας k), η μορφή είναι:

$$\left(\frac{da}{d\tau}\right)^2 = \frac{8\pi Gc}{3} \rho \alpha^4 - k \alpha^2 \quad (3.4)$$

όπου η συνολική πυκνότητα ενέργειας ρ περιλαμβάνει τους όρους της ακτινοβολίας ρ_r , της ύλης ρ_m και την Κοσμολογική Σταθερά Λ με την αντίστοιχη πυκνότητα ρ_Λ . Αντικαθιστώντας τη σειρά $\alpha^2(\tau) = c_1 \tau^2 + c_2 \tau^4 + c_3 \tau^6 + \dots$ στις εξισώσεις, βρίσκουμε τους συντελεστές. Συγκεκριμένα, για τον c_1 , ο οποίος είναι ο «κυρίαρχος» όρος στο Big Bang, έχουμε:

¹ Περισσότερα για την έννοια του σύμμορφου χρόνου στο Παράρτημα Α.

$$c_1 = \frac{8\pi G c \rho_{r,0}}{3} \alpha_o^4 \quad (3.5)$$

Αυτός ο όρος καθορίζει την αρχική ταχύτητα διαστολής. Για τον c_2 προκύπτει:

$$c_2 = \frac{1}{4} \left(\frac{8\pi G c \rho_{m,0}}{3} \alpha_o^3 \sqrt{c_1} - k c_1 \right) \quad (3.6)$$

Γιατί μας νοιάζει ο c_2 ; Ουσιαστικά περιγράφει την πρώτη απόκλιση από την καθαρή ακτινοβολία. Αν ο c_2 είναι μηδέν, το σύμπαν ξεκινά ως τέλεια επίπεδο και γεμάτο μόνο με φως. Αν είναι διάφορος του μηδενός, μας δείχνει πώς η καμπυλότητα και η μάζα αρχίζουν να «φρενάρουν» ή να επηρεάζουν τη διαστολή αμέσως μετά το Big Bang.

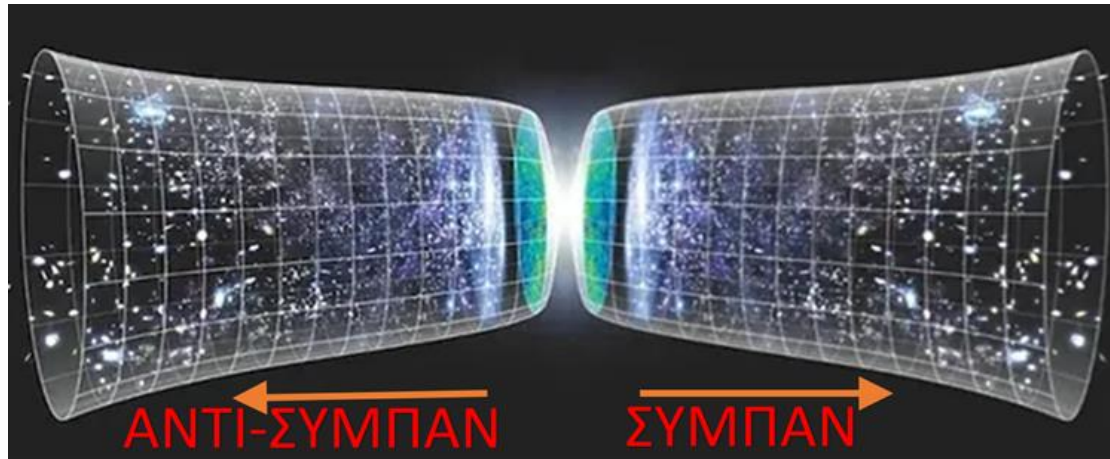
Για τον συντελεστή c_3 , η ακριβής μορφή προκύπτει αν συνεχίσουμε την ίδια μέθοδο αντικατάστασης (matching coefficients) στην εξίσωση Friedmann, λαμβάνοντας υπόψη και την κοσμολογική σταθερά (σκοτεινή ενέργεια). Στο ανάπτυγμα της σειράς $a^2(\tau) = c_1 \tau^2 + c_2 \tau^4 + c_3 \tau^6 + \dots$, ο c_3 εκφράζει την επίδραση της ενέργειας του κενού σε συνδυασμό με τις διορθώσεις από την ύλη και την καμπυλότητα. Ο συντελεστής που προκύπτει είναι:

$$c_3 = \frac{1}{9} \left(\frac{8\pi G \rho_\Lambda}{3} c_1^3 + \frac{c_2}{c_1} (4c_2 + k c_1) \right) \quad (3.7)$$

Ενώ ο c_1 κυριαρχεί στο «πολύ νωρίς» (Big Bang) και ο c_2 στη μετάβαση προς την ύλη, ο c_3 αρχίζει να γίνεται σημαντικός καθώς το σύμπαν μεγαλώνει και η κοσμολογική σταθερά Λ αρχίζει να επηρεάζει τη γεωμετρία. Αν οι συντελεστές c_n ακολουθούν αυτή τη δομή, τότε το Big Bang δεν είναι «τοίχος», αλλά ένας κόμβος (node) σε μια συνεχή τροχιά. Αυτό επιτρέπει στους ερευνητές να υπολογίσουν την εντροπία και την κατανομή της ύλης χωρίς να επικαλεστούν το πεδίο inflaton.

Η «μαγεία» της υπόθεσης των Turok et al. κρύβεται στην απαίτηση η σειρά αυτή να είναι πεπερασμένη ή συγκλίνουσα με συγκεκριμένο τρόπο. Στην εργασία του 2018, χρησιμοποιούν αυτούς τους συντελεστές για να ορίσουν την εντροπία του σύμπαντος. Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι για να είναι το σύμπαν «σταθερό» και αναλυτικό στο μιγαδικό επίπεδο, οι συντελεστές αυτοί πρέπει να ικανοποιούν μια συνθήκη που ονομάζεται Weyl Curvature Hypothesis (Υπόθεση Καμπυλότητας

Weyl)². Στην καρδιά της βρίσκεται μια προσπάθεια να εξηγηθεί γιατί το σύμπαν ξεκίνησε με τόσο χαμηλή εντροπία και γιατί είναι τόσο ομοιογενές. Συγκεκριμένα, υποστηρίζουν ότι κοντά στο $\tau = 0$, η καμπυλότητα Weyl πρέπει να μηδενίζεται. Αυτό επιβάλλει στο σύμπαν να είναι εξαιρετικά ομοιογενές και επίπεδο ($k=0$), χωρίς να χρειάζεται ο πληθωρισμός για να «ισιώσει» τον χώρο.



Εικόνα 1: Το σύμπαν μας, μπορεί να είναι ένα κατοπτρικό «αδελφάκι» ενός σύμπαντος αντιύλης το οποίο εκτείνεται αντίστροφα στο χρόνο. (Image credit: Getty Images - Διαμόρφωση: Γιώργος Κουνδουράκης).

Σε ένα σύμπαν που κυριαρχείται από ακτινοβολία (όπως ήταν το πρώιμο σύμπαν), η σχέση του παράγοντα κλίμακας με τον σύμμορφο χρόνο είναι μία σχέση αναλογίας, δηλαδή, $a(\tau) \propto \tau$, σύμφωνα με το ανάπτυγμα Taylor της (3.3). Αυτό σημαίνει ότι, για $\tau > 0$, έχουμε το δικό μας διαστελλόμενο σύμπαν, για $\tau = 0$, έχουμε το σημείο της Μεγάλης Έκρηξης και για $\tau < 0$, έχουμε ένα «είδωλο» σύμπαν το οποίο προηγείται της Μεγάλης Έκρηξης. Η περιττή συμμετρία της $a(\tau)$ συνεπάγεται ότι η περιοχή $\tau > 0$ (το σύμπαν μας) και η περιοχή $\tau < 0$ (το «αντισύμπαν») συνδέονται μέσω ενός μετασχηματισμού CPT. Η Μεγάλη Έκρηξη στο $\tau = 0$ δεν θεωρείται ένα τυχαίο όριο, αλλά ένας καθρέπτης συμμετρίας. Στην κλασική κοσμολογία, η Μεγάλη Έκρηξη θεωρείται μια «ανωμαλία» (singularity) όπου ο $a(\tau)$ μηδενίζεται ($a=0$) και οι εξισώσεις καταρρέουν. Οι Boyle-Finn-Turok υποθέτουν ότι αυτή η ανωμαλία είναι μαθηματικά «ήπια» και ότι μπορούμε να επεκτείνουμε τη συνάρτηση $a(\tau)$ και για αρνητικές τιμές του τ ($\tau < 0$).

² Αναλυτικά για αυτή την υπόθεση βλέπουμε στο Παραρτημα Β

Συμπερασματικά, οι Boyle et al. υποστηρίζουν ότι δεν χρειάζεται πληθωρισμός αν το σύμπαν είναι CPT-συμμετρικό, διότι το «πριν» και το «μετά» συνδέονται μαθηματικά μέσω της $\alpha(\tau)$. Οι συνθήκες στο $\tau > 0$ καθορίζονται από τις συνθήκες στο $\tau < 0$. Η κατάσταση στο $\tau = 0$ (Big Bang) είναι εξαιρετικά απλή και συμμετρική. Ο $\alpha(\tau)$ συμπεριφέρεται με τέτοιο τρόπο ώστε η γεωμετρία του χωροχρόνου να παραμένει «περιορισμένη» (conformal infinity), αποφεύγοντας το χάος που θα απαιτούσε πληθωρισμό για να διορθωθεί. Πρακτικά η εντροπία κοντά στο $\tau = 0$ θεωρείται μηδενική. Σύμφωνα με την υπόθεσή του CPT συμμετρικού σύμπαντος, το σύμπαν δεν «γεννήθηκε» στο μηδέν, αλλά «ανακλάται» στο μηδέν. Αν φανταστούμε τον σύμμορφο χρόνο ως έναν άξονα, το σύμπαν είναι ένας «διπλός κώνος» όπου η κορυφή είναι το Big Bang (βλ. εικόνα 1). Μαθηματικά, αυτή η παραδοχή επιτρέπει τον υπολογισμό των κβαντικών καταστάσεων (vacuum states) του σύμπαντος με μοναδικό τρόπο. Η αναλυτικότητα του $\alpha(\tau)$ επιβάλλει στο κενό να είναι το λεγόμενο «CPT-invariant vacuum», το οποίο: εξηγεί την ποσότητα της Σκοτεινής Ύλης (μέσω της βαρυτικής παραγωγής δεξιόστροφων νετρίνων στο $\tau = 0$) και προβλέπει ότι δεν υπάρχουν αρχέγονα βαρυτικά κύματα (κάτι που έρχεται σε άμεση αντίθεση με τον πληθωρισμό).

3.2 Μία νέα ερμηνεία βαρυονικής ασυμμετρίας μέσω του CPT-Συμμετρικού Σύμπαντος

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε λίγο καλύτερα τη μαθηματική δομή της βαρυονικής ασυμμετρίας και της προκύπτουσας επιλογής του κενού (CPT-Symmetric Vacuum).

Στην κβαντική θεωρία πεδίου σε καμπύλο χωρόχρονο, η επιλογή της κατάστασης κενού $|0\rangle$ είναι κρίσιμη. Συνήθως, η βαρυογένεση απαιτεί την παραβίαση της CP συμμετρίας. Στο CPT-συμμετρικό μοντέλο, η συνολική δράση S του συστήματος είναι αναλλοίωτη υπό CPT. Ας δούμε γιατί.

Θεωρούμε ένα φερμιονικό πεδίο ψ . Η δράση είναι:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} [\bar{\psi} i \gamma^\mu \nabla_\mu \psi - M \bar{\psi} \psi] \quad (3.8)$$

Η έκφραση μέσα στην αγκύλη χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει τον κινητικό όρο $\bar{\psi} i \gamma^\mu \nabla_\mu \psi$, ο οποίος περιγράφει την κίνηση και την αλληλεπίδραση

του σωματιδίου με τη γεωμετρία του χώρου. Ο δεύτερος όρος είναι ο όρος μάζας, που καθορίζει την ενέργεια ηρεμίας του σωματιδίου. Η παραπάνω μορφή αποτελεί τη βάση για τη μελέτη κβαντικών πεδίων σε εξωτερικά βαρυτικά πεδία [Η τετραγωνική ρίζα της ορίζουσας του μετρικού τανυστή $g_{\mu\nu}$ (με αρνητικό πρόσημο για να είναι θετική η υπόριζη ποσότητα) χρησιμοποιείται για να είναι το ολοκλήρωμα αναλλοίωτο (invariant) υπό μετασχηματισμούς συντεταγμένων].

Στο σημείο $t=0$, η επιβολή της CPT συμμετρίας αναγκάζει τις κβαντικές διακυμάνσεις να είναι συσχετισμένες μεταξύ των δύο εποχών. Η βαρυονική ασυμμετρία προκύπτει από την απαίτηση το κενό να είναι αναλλοίωτο υπό τον συνδυασμένο μετασχηματισμό CPT, γεγονός που οδηγεί σε μια συγκεκριμένη πυκνότητα αριθμού n_B βαρυονικών σωματιδίων.

Η θεωρία εισάγει τρία δεξιά (sterile) νετρίνα N_R , τα οποία είναι απαραίτητα για τη μάζα των νετρίνων μέσω του μηχανισμού seesaw³. Η μάζα Majorana M αυτών των νετρίνων παίζει καθοριστικό ρόλο. Η βαρυονική ασυμμετρία συνδέεται με τη λεπτογένεση (leptogenesis), όπου η ασυμμετρία στον λεπτονικό αριθμό L μετατρέπεται σε βαρυονική ασυμμετρία μέσω σφαλερονίων (sphalerons). Σύμφωνα με τους Boyle et al. (2018), η πυκνότητα της σκοτεινής ύλης και η βαρυονική ασυμμετρία εξηγούνται ταυτόχρονα αν το ένα από τα δεξιά νετρίνα είναι σταθερό (λόγω μιας $\mathbb{Z}_2$ συμμετρίας) και έχει μάζα $M \approx 4.8 \cdot 10^8$ GeV. Στη συνέχεια αναλύουμε τις δύο αυτές «απαιτήσεις» του μοντέλου.

Η συγκεκριμένη τιμή των $4.8 \cdot 10^8$ GeV αποτελεί το «κλειδί» του μοντέλου του CP-συμμετρικού Σύμπαντος (Mirror Universe). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η σκοτεινή ύλη αποτελείται από δεξιόστροφα νετρίνα (Right-Handed Neutrinos - RHN) που παράγονται μέσω του μηχανισμού βαρυτικής παραγωγής. Στο μοντέλο των Turok et al., το σύμπαν πριν και μετά το Big Bang διέπεται από μια συμμετρία CPT. Για να εξηγηθεί η σκοτεινή ύλη χωρίς την ανάγκη εξωτικών σωματιδίων, υποθέτουν ότι ένα από τα τρία δεξιόστροφα νετρίνα είναι σταθερό. Η μάζα αυτού του σωματιδίου (M) καθορίζει την πυκνότητα της σκοτεινής ύλης σήμερα.

Η κεντρική ιδέα, για τη μαθηματική τεκμηρίωση, και αναζήτηση της μάζας αυτού του σωματιδίου, πηγάζει από την εξίσωση της παρατηρούμενης πυκνότητας της

³ Για τον συγκεκριμένο μηχανισμό μπορούμε να ανατρέξουμε στο Παράρτημα Γ.

σκοτεινής ύλης Ω_{dm} , με την πυκνότητα που παράγεται από τη βαρυτική παραγωγή σωματιδίων κατά την περίοδο της κυριαρχίας της ακτινοβολίας κοντά στο Big Bang.

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς των Boyle και Turok, η πυκνότητα αριθμού n των δεξιόστροφων νετρίνων που παράγονται βαρυτικά δίνεται από τη σχέση:

$$n \approx \frac{M^3}{24\pi^2} \left(\frac{M}{M_{pl}} \right)^{3/2} \quad (3.9)$$

όπου M είναι η μάζα του δεξιόστροφου νετρίνου (αυτή που αναζητούμε) και M_{pl} η μάζα Planck (περίπου $1.22 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$). Η σημερινή αναλογία της σκοτεινής ύλης προς την εντροπία S πρέπει να ταυτίζεται με την παρατηρούμενη τιμή. Η σχέση που προκύπτει και συνδέει τη μάζα M με την παράμετρο Ω_{dm} είναι:

$$\Omega_{dm} h^2 \approx 0.12 \left(\frac{M}{4.8 \cdot 10^8 \text{ GeV}} \right)^{3/2} \quad (3.10)$$

όπου Ω_{dm} το κλάσμα της ενεργειακής πυκνότητας του σύμπαντος που είναι σκοτεινή ύλη και h η παράμετρος (σταθερά Hubble) που εκφράζει το ρυθμό διαστολής ($h \approx 0.67$). Για να βρούμε την τιμή του M , απομονώνουμε τη μεταβλητή. Αν θέσουμε την παρατηρούμενη πυκνότητα από τον δορυφόρο Planck $\Omega_{dm} h^2 = 0.12$ (το οποίο δίνει $\Omega_{dm} \approx 0.26$) στην (3.10) είναι φανερό ότι $M \approx 4.8 \cdot 10^8 \text{ GeV}$. Η τιμή 10^8 GeV είναι συμβατή με τον προαναφερθέντα μηχανισμό seesaw ο οποίος εξηγεί γιατί τα κανονικά νετρίνα που βλέπουμε στο εργαστήριο έχουν τόσο μικρή μάζα. Η εξαγωγή της μάζας αυτής βασίζεται στην παραδοχή ότι ο χωρόχρονος είναι επίπεδος (flat) και ότι δεν υπήρξε πληθωρισμός (inflation), καθώς το μοντέλο του Turok προτείνει μια εναλλακτική στον πληθωρισμό, όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα.

Για την περίπτωση του σφαλερονικού μηχανισμού⁴, η μαθηματική έκφραση για την εξέλιξη του βαρυονικού αριθμού B δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dB}{dt} \propto -\Gamma_{sph}(t) \frac{B}{t} \quad (3.11)$$

⁴ Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί το «κλειδί» σύνδεσης της λεπτογένεσης, μέσω του seesaw μηχανισμού, και της βαρυονικής ασυμμετρίας.

όπου Γ_{sph} είναι ο ρυθμός μετάβασης των σφαλερονίων. Οι Anchordoqui και Antoniadis (2019) δείχνουν ότι σε ένα CPT-συμμετρικό πλαίσιο, αυτές οι διεργασίες μπορούν να εξηγήσουν ανώμαλα φαινόμενα υψηλής ενέργειας. Η ενέργεια ενός σφαλερονίου στο Καθιερωμένο Πρότυπο είναι:

$$E_{sph} \approx \frac{2\pi M_W}{a_W} B(\kappa) \approx 9TeV \quad (3.12)$$

με το M_W να αντιπροσωπεύει τη μάζα του μποζονίου W. Είναι η μάζα του φορέα της ασθενούς πυρηνικής δύναμης. Η τιμή του είναι περίπου 80.4 GeV. Η παρουσία του στην εξίσωση δείχνει ότι το σφαλερόνιο είναι μια δομή που πηγάζει απευθείας από τον μηχανισμό Higgs και την ηλεκτρασθενή αλληλεπίδραση. Το a_W είναι η σταθερά σύζευξης της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Πρόκειται για την «ισχύ» της ασθενούς δύναμης. Ορίζεται ως $a_W = g^2/4\pi$, όπου g είναι η σταθερά σύζευξης της ομάδας συμμετρίας SU(2). Επειδή η τιμή της είναι μικρή (περίπου 0.033), η διαίρεση με αυτόν τον αριθμό κάνει την ενέργεια των σφαλερονίων πολύ μεγαλύτερη από τη μάζα των μεμονωμένων σωματιδίων. Η $B(\kappa)$ είναι η «συνάρτηση προφίλ», δηλαδή μια αδιάστατη συνάρτηση που εξαρτάται από την παράμετρο κ η οποία αναφέρεται στον λόγο της μάζας του μποζονίου Higgs προς τη μάζα του μποζονίου W ($\kappa=M_H/M_W$). Η τιμή της συνάρτησης $B(\kappa)$ κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1.5 και 2.7, ανάλογα με τη μάζα του Higgs⁵.

Στο CPT σύμπαν, η ισορροπία μεταξύ $\tau>0$ και $\tau<0$ διασφαλίζει ότι ο συνολικός βαρυονικός αριθμός του «πλήρους» σύμπαντος (συμμετρικού-αντισυμμετρικού) είναι μηδέν. Σε αυτό το κοσμολογικό μοντέλο στη δική μας πλευρά του χρόνου παρατηρούμε πλεόνασμα ύλης, ενώ στην «άλλη» πλευρά θα υπάρχει πλεόνασμα αντιύλης.

Η θεωρία αυτή δεν είναι μόνο μία μαθηματική κατασκευή, αλλά μπορεί ταυτόχρονα να ελεγχθεί πειραματικά και να προσφέρει πιθανές απαντήσεις σε πρόσφατα πειραματικά «αινίγματα». Το πείραμα ANITA παρατήρησε δύο γεγονότα υπερ-υψηλής ενέργειας (~500 PeV) που αναδύονταν από τον πάγο της Ανταρκτικής

⁵ Αναλυτικότερα για τον μηχανισμό των σφαλερονίων (sphalerons) μπορούμε να δούμε στο τέλος της μελέτης στο Παράρτημα Δ.

(Anchordoqui et al., 2019). Αυτά τα γεγονότα εξηγούνται ως η διάσπαση του δεξιού νετρίνου Majorana (το οποίο δεχόμαστε ότι αποτελεί τη σκοτεινή ύλη του CPT μοντέλου). Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης σ για ένα τέτοιο σωματίδιο στο εσωτερικό της Γης υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\frac{d\sigma}{dy} = \frac{G_F^2 M E_\nu}{2\pi} [q(x) + (1-y)^2 \bar{q}(x)] \quad (3.13)$$

Μπορούμε να αναλύσουμε λίγο την παραπάνω εξίσωση⁶. Αυτή η εξίσωση είναι θεμελιώδης στη σωματιδιακή φυσική και περιγράφει τη διαφορική ενεργό διατομή ($d\sigma/dy$) για τη βαθιά ανελαστική σκέδαση (Deep Inelastic Scattering - DIS) ενός νετρίνου πάνω σε ένα νουκλεόνιο (πρωτόνιο ή νετρόνιο). Ουσιαστικά, μας λέει την πιθανότητα να αλληλεπιδράσει ένα νεutrino με τα κουάρκ που βρίσκονται μέσα στον πυρήνα, μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης (ανταλλαγή μποζονίου W^+). Το y (Μεταβλητή ανελαστικότητας/Inelasticity variable) ορίζεται ως το κλάσμα της ενέργειας του νετρίνου που μεταφέρεται στο νουκλεόνιο στο σύστημα ηρεμίας του εργαστηρίου. Παίρνει τιμές από 0 έως 1. Η G_F (Σταθερά Fermi) είναι η σταθερά που καθορίζει την ισχύ της ασθενούς αλληλεπίδρασης σε χαμηλές ενέργειες. Η τιμή της είναι περίπου $1.166 \cdot 10^{-5} \text{GeV}^{-2}$. Επειδή είναι υψωμένη στο τετράγωνο (G_F^2) δείχνει πόσο σπάνιες είναι οι αλληλεπιδράσεις των νετρίνων με την ύλη⁷. Το γινόμενο $M \cdot E_\nu$ σχετίζεται με την ενέργεια στο κέντρο μάζας του συστήματος, όπου M η μάζα του νουκλεονίου (στόχου) και E_ν η ενέργεια του προσπίπτοντος νετρίνου. Η δομή της εξίσωσης μέσα στην αγκύλη μας αποκαλύπτει τη φύση της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Ο όρος $q(x)$ δηλώνει ότι τα νετρίνα είναι «αριστερόστροφα» (left-handed) σωματίδια. Η αλληλεπίδρασή τους με τα αριστερόστροφα κουάρκ είναι ισότροπη (δεν εξαρτάται από το y), γι' αυτό ο όρος $q(x)$ δεν έχει πολλαπλασιαστή. Ο όρος $(1-y)^2 \bar{q}(x)$ δηλώνει ότι λόγω της διατήρησης της στροφορμής (spin), η σκέδαση

⁶ Η παραπάνω εξίσωση έχει μεγάλη ιστορική σημασία. Επέτρεψε στους φυσικούς να επιβεβαιώσουν ότι, τα κουάρκ έχουν spin 1/2, τα αντικουάρκ υπάρχουν μέσα στο πρωτόνιο ως «θάλασσα» ζευγών $q\bar{q}$ και ότι η ασθενής δύναμη παραβιάζει πλήρως την ομοτιμία (parity).

⁷ Για αυτό και αποκαλούνται «σωματίδια φαντάσματα». Επειδή η σταθερά Fermi είναι πάρα πολύ μικρή, τα νετρίνα μπορούν να διαπεράσουν ολόκληρους πλανήτες χωρίς να αγγίξουν ούτε ένα άτομο. Για παράδειγμα, κάθε δευτερόλεπτο, περίπου 65 δισεκατομμύρια νετρίνα από τον Ήλιο περνούν μέσα από κάθε τετραγωνικό εκατοστό του σώματός μας (ακόμα και τη νύχτα, αφού περνούν μέσα από τη Γη), χωρίς εμφανή αλληλεπίδραση με το σώμα μας.

νετρίνου με ένα δεξιόστροφο αντικουάρκ καταστέλλεται όταν η μεταφορά ενέργειας είναι μεγάλη ($y \rightarrow 1$). Ο παράγοντας $(1-y)^2$ είναι η «υπογραφή» της V-A (Vector minus Axial) δομής της ασθενούς δύναμης.

Οι Anchordoqui et al. (2019) υποστηρίζουν ότι αυτά τα «ανοδικά» (upgoing) γεγονότα είναι η άμεση υπογραφή της σκοτεινής ύλης που προβλέπει το CPT-συμμετρικό σύμπαν. Το σωματίδιο σκοτεινής ύλης διασπάται:

$$N \rightarrow H + \nu_{\text{light}} \quad (3.14)$$

όπου H είναι το μποζόνιο Higgs και ν_{light} ένα ελαφρύ νεutrino που προκαλεί τον πίδακα (shower).

Κάποια, πρώτα, συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από τα παραπάνω δεδομένα. Η νέα ερμηνεία της βαρυονικής ασυμμετρίας καταργεί την ανάγκη για τον κοσμικό πληθωρισμό. Οι βασικές μαθηματικές προβλέψεις που προκύπτουν αφορούν, τη μάζα των νετρίνων, τη μαγιорάνα φύση τους και την απουσία των αρχέγονων βαρυτικών κυμάτων. Συγκεκριμένα το ελαφρύτερο νεutrino πρέπει να είναι αυστηρά άμαζο ($m_{\text{min}}=0$). Τα νετρίνα είναι ιδιοκαταστάσεις Majorana⁸, κάτι που μπορεί να επαληθευτεί από την παρατήρηση της διπλής βήτα διάσπασης χωρίς νετρίνα (0νββ)⁹. Επίσης, σε αντίθεση με το συμβατικό μοντέλο του πληθωρισμού, το CPT-συμμετρικό σύμπαν δεν προβλέπει αρχέγονα βαρυτικά κύματα μεγάλου μήκους κύματος (B-modes στην CMB). Η μαθηματική κομψότητα του μοντέλου έγκειται στο ότι χρησιμοποιεί μόνο τα σωματίδια του Καθιερωμένου Προτύπου (με την προσθήκη των δεξιών νετρίνων) και μια θεμελιώδη συμμετρία της φύσης για να εξηγήσει την εμφάνιση της ύλης και της σκοτεινής ύλης ταυτόχρονα (Boyle et al., 2018; Boyle et al., 2022).

⁸ Οι ιδιοκαταστάσεις Majorana περιγράφονται στο Παράρτημα Ε.

⁹ Σε αυτή την υποθετική περίπτωση, τα δύο νετρίνια μετατρέπονται σε δύο πρωτόνια και εκπέμπουν μόνο δύο ηλεκτρόνια. Τα νετρίνα που θα έπρεπε να εκπέμψουν «εξαφανίζονται». Για να συμβεί αυτό, πρέπει το ένα νεutrino που εκπέμπεται από το πρώτο νετρίνιο να «απορροφηθεί» αμέσως από το δεύτερο ως αντινεutrino. Έτσι το νεutrino, ως σωματίδιο Majorana, θα είναι το μοναδικό σωματίδιο ύλης που είναι ταυτόχρονα και το αντισωματίδιό του.

3.3 Μία «οικονομική» εξήγηση της κοσμολογικής σκοτεινής ύλης

Σε αυτή την νεότητα θα μιλήσουμε αναλυτικότερα για τον τρόπο σχηματισμού των δεξιόχειρων (στείρων) νετρίνο (right-handed neutrino), των υποψήφιων σωματιδίων της σκοτεινής ύλης σύμφωνα με το μοντέλο του CPT symmetric Universe.

Ενώ το Καθιερωμένο Πρότυπο περιλαμβάνει τρεις γενιές σωματιδίων, η απαίτηση για συμμετρία CPT και η ακύρωση των ανωμαλιών Weyl υποδεικνύουν ότι πρέπει να υπάρχουν τρία δεξιόχειρα νετρίνα (Turok & Boyle, 2023). Μία από αυτές τις καταστάσεις σταθεροποιείται από μια διακριτή συμμετρία $\mathbb{Z}_2$, καθιστώντας την ιδανικό υποψήφιο για τη σκοτεινή ύλη όπως προαναφέραμε (Boyle et al., 2018).

Ο μηχανισμός παραγωγής δεν βασίζεται σε θερμική σύγκρουση, αλλά σε μια κβαντική διαδικασία που συμβαίνει κατά τη διέλευση από την κοσμολογική ανωμαλία (Big Bang). Στην ακτινοβολούμενη εποχή, η μετρική FRW (Friedmann-Robertson-Walker) περιγράφεται από τον σύμμορφο χρόνο όπως είδαμε στην εξίσωση (3.1) και η συμμετρία CPT επιβάλλει μια προτιμώμενη κατάσταση κενού που είναι αναλλοίωτη υπό τον μετασχηματισμό $\tau \rightarrow -\tau$, όπως είδαμε στην εξίσωση (3.2) (Boyle et al., 2018; Boyle et al., 2022).

Το πεδίο ενός δεξιόχειρου νετρίνου Majorana N με μάζα M ικανοποιεί την εξίσωση Dirac σε καμπύλο χωρόχρονο. Μετά από έναν σύμμορφο μετασχηματισμό του πεδίου $\psi = a^{3/2}N$, η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$[i\gamma^\mu - M\alpha(\tau)]\psi(x, \tau) = 0 \quad (3.15)$$

Εδώ παρατηρούμε ότι η μάζα «αισθάνεται» τη διαστολή του σύμπαντος μέσω του παράγοντα κλίμακας $a(\tau)$. Στο ακτινοβολούμενο σύμπαν, $a(\tau) \propto \tau$, όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα.

Λόγω της εξάρτησης από τον χρόνο, μπορούμε να ορίσουμε δύο διαφορετικές βάσεις λύσεων για το πεδίο (Boyle et al., 2022; Boyle et al., 2023). Την ιδιοκατάσταση «In» ($|0_{\text{in}}\rangle$), στην οποία το κενό ορίζεται από το μηδέν προς το παρελθόν, δηλαδή σε ένα αντίστροφο χρόνο, πριν το Big Bang όπου $\tau \rightarrow -\infty$. Η ιδιοκατάσταση «Out» ($|0_{\text{out}}\rangle$), ορίζεται από το μηδέν προς το μέλλον, δηλαδή μετά το Big Bang όπου $\tau \rightarrow +\infty$. Η συμμετρία CPT επιβάλλει μια μοναδική κατάσταση κενού που είναι

αναλλοίωτη υπό τον μετασχηματισμό $\tau \rightarrow -\tau$. Αυτή η κατάσταση αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο συνδυασμό των «In» και «Out» καταστάσεων.

Για έναν παρατηρητή σε μεταγενέστερο χρόνο, αυτό το CPT-αναλλοίωτο κενό δεν φαίνεται άδειο, αλλά περιέχει έναν πεπερασμένο αριθμό σωματιδίων. Η σχέση μεταξύ των τελεστών καταστροφής εισόδου (b_{in}) και εξόδου (b_{out}) δίνεται από τον μετασχηματισμό Bogoliubov:

$$\begin{aligned} b_{out}(k) &= \alpha_k b_{in}(k) + \beta_k b_{in}^\dagger(-k) \\ &\& \\ b_{in}(k) &= \alpha_k^* b_{out}(k) - \beta_k b_{out}^\dagger(-k) \end{aligned} \tag{3.16}$$

Τι είναι τα b , α , β ; Τα $b_{in}(k)$ και $b_{in}(-k)$ είναι οι τελεστές καταστροφής και δημιουργίας για ένα «εισερχόμενο» (input) πεδίο με ορμή k και $-k$. Το $b_{out}(k)$ είναι ο τελεστής για το «εξερχόμενο» (output) πεδίο μετά από κάποια αλληλεπίδραση (π.χ. πέραςμα από έναν κρύσταλλο BBO ή εξέλιξη σε ένα διαστελλόμενο σύμπαν).

Οι α και β ονομάζονται συντελεστές Bogoliubov και ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} |\alpha_k|^2 + |\beta_k|^2 &= 1, \text{ για φερμιόνια} \\ &\& \\ |\alpha_k|^2 - |\beta_k|^2 &= 1, \text{ για μποζόνια} \end{aligned} \tag{3.17}$$

Επειδή υπάρχει το μείον στη δεύτερη σχέση, οι συντελεστές αυτοί μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή (αρκεί η διαφορά των τετραγώνων τους να είναι 1). Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία άπειρου αριθμού σωματιδίων, κάτι που ταιριάζει στα μποζόνια. Για τα φερμιόνια, λόγω της Απαγορευτικής Αρχής του Pauli, η σχέση γράφεται με $+$ και δηλώνει ότι η πιθανότητα να βρεις ένα σωματίδιο σε μια κατάσταση δεν μπορεί να υπερβαίνει τη μονάδα.

Οι μετασχηματισμοί Bogoliubov, όπως καταλαβαίνουμε, αποτελούν την «καρδιά» του μηχανισμού παραγωγής της σκοτεινής ύλης στο μοντέλο του CPT-συμμετρικού σύμπαντος. Σύμφωνα με τους Boyle και Turok, η σκοτεινή ύλη δεν προέρχεται από θερμική παραγωγή (WIMPs), αλλά από την κβαντική διέγερση του κενού κατά τη στιγμή της Μεγάλης Έκρηξης.

Αν ξεκινήσουμε με το κενό $|0_{in}\rangle$ όπου δεν υπάρχει παρουσία σωματιδίων στο «πριν», ο αριθμός των σωματιδίων N_k που θα ανιχνεύσει ένας παρατηρητής στο «μετά» ($|0_{out}\rangle$) δίνεται από το τετράγωνο του συντελεστή β_k ¹⁰:

$$\langle 0_{in} | \hat{N}_{out,k} | 0_{in} \rangle = |\beta_k|^2 \quad (3.18)$$

Στο μοντέλο των Boyle et al. (2022), ο υπολογισμός του β_k βασίζεται στη διέλευση του πεδίου από το σημείο $a(0)=0$. Για ένα δεξιόχειρο νετρίνο με μάζα M , ο συντελεστής υπολογίζεται ως:

$$|\beta_k|^2 = \frac{1}{1 + e^{2\pi\omega/H_{eff}}} \quad (3.19)$$

Αυτή η μορφή μοιάζει με κατανομή Fermi-Dirac. Η ουσία αυτού του μετασχηματισμού είναι ότι αναμιγνύει τους τελεστές δημιουργίας και καταστροφής. Αυτό έχει, ως ενδιαφέρουσα συνέπεια, την παραγωγή σωματιδίων από το «τίποτα». Αν ο συντελεστής β_k δεν είναι μηδέν, τότε το «κενό» του εισερχόμενου πεδίου δεν είναι κενό για το εξερχόμενο πεδίο. Με απλά λόγια, η διαδικασία αυτή δημιουργεί ζεύγη σωματιδίων (π.χ. φωτόνια) από το μηδέν. Η «οικονομική» πτυχή του CPT-Συμμετρικού Σύμπαντος εδράζεται στην αυτόματη παραγωγή της σκοτεινής ύλης, λόγω της γεωμετρικής ασυνέχειας του Big Bang και της απαίτησης για CPT συμμετρία (Boyle et al., 2018).

Η συνολική πυκνότητα της σκοτεινής ύλης Ω_{dm} προκύπτει από την ολοκλήρωση του $|\beta_k|^2$ σε όλες τις ορμές k . Οι Turok και Boyle (2022) έδειξαν ότι για να ταυτίζεται αυτή η παραγωγή με την παρατηρούμενη σκοτεινή ύλη ($\Omega_{dm} \approx 0.267$), η μάζα του δεξιόχειρου νετρίνου M πρέπει να είναι, $M \approx 4.8 \cdot 10^8 \text{ GeV}$, όπως είδαμε στις εξισώσεις (3.9) και (3.10) και συζητήσαμε στην προηγούμενη υποενότητα. Αυτό το σωματίδιο είναι σταθερό επειδή η συμμετρία $\mathbb{Z}_2$ που προκύπτει από το μοντέλο εμποδίζει τη διάσπασή του σε σωματίδια του Καθιερωμένου Προτύπου (Boyle et al., 2022).

¹⁰ Επίσης, μαθηματικά, το $|\alpha_k|^2$ «επιβάλλει» στον μετασχηματισμό να διατηρεί τις κβαντικές σχέσεις μετάθεσης. Αν το $|\beta_k|^2$ είναι η «πηγή» των νέων σωματιδίων, το $|\alpha_k|^2$ είναι ο παράγοντας που εξασφαλίζει ότι το νέο πεδίο b_{out} παραμένει ένα έγκυρο κβαντικό πεδίο. Δηλαδή, το $|\alpha_k|^2$ συνδέεται άμεσα με τη διατήρηση της πιθανότητας και τις κβαντικές διακυμάνσεις.

Συγκεντρωτικά μπορούμε να δούμε τη συνολική διάταξη των νετρίνων, στον παρακάτω Πίνακα, η ταξινόμηση των οποίων ακολουθεί την Κανονική Ιεραρχία (Normal Hierarchy)¹¹ στο μοντέλο που περιγράφουμε.

Νετρίνο	Ρόλος στο CPT Μοντέλο	Κατάσταση Μάζας
ν_{L1}	Αντιστοιχεί στο νετρίνο που είναι κυρίως «ηλεκτρονικό»	Η μαθηματική συνέπεια της CPT συμμετρίας επιβάλλει $m_1=0$
ν_{L2}	Αντιστοιχεί στο νετρίνο που σχετίζεται με τις ηλιακές ταλαντώσεις	Η μάζα του είναι περίπου 0.0086eV (και στο σύνηθες Καθιερωμένο Πρότυπο)
ν_{L3}	Αντιστοιχεί στο νετρίνο που σχετίζεται με τις ατμοσφαιρικές ταλαντώσεις	Η μάζα του είναι περίπου 0.05eV (και στο σύνηθες Καθιερωμένο Πρότυπο)
ν_{R1}	Συνδέεται με το ν_{L1}	Παραμένει άμαζο ή πολύ ελαφρύ
ν_{R2}	Συμμετέχει στο μηχανισμό «Seesaw»	Ενδιάμεση μάζα
ν_{R3}	Θεωρείται σταθερό και αποτελεί την εξήγηση για τη Σκοτεινή Ύλη του Σύμπαντος.	Περίπου $4.8 \cdot 10^8 \text{ GeV}$

Πίνακας 1: Συνοπτική παρουσίαση των 3 αριστερόχειρων και των 3 δεξιόχειρων (sterile) νετρίνων του μοντέλου του CPT Συμμετρικού Σύμπαντος.

Αν το ν_{L1} είχε μάζα, θα έπρεπε να «ζευγαρώσει» με ένα δεξιόχειρο για να την αποκτήσει (μέσω του μηχανισμού Higgs ή Majorana). Το CPT μοντέλο αποδεικνύει ότι για να είναι το Σύμπαν απόλυτα συμμετρικό ως προς τον χρόνο στο Big Bang, μία από αυτές τις «γέφυρες» μάζας πρέπει να είναι σπασμένη. Το γεγονός ότι $m_1 = 0$ επιτρέπει στο Σύμπαν να περάσει μέσα από το σημείο μηδέν του χρόνου και να βγει από την άλλη πλευρά (το αντι-σύμπαν) χωρίς μαθηματικές ανωμαλίες. Έτσι, το αριστερόχειρο

¹¹ Για τη Κανονική Ιεραρχία και την Αντίστροφη Ιεραρχία συζητάμε αναλυτικότερα στο Παράρτημα Ε.

ν_{L1} μένει «ορφανό» από μάζα, κάτι που αποτελεί την «υπογραφή» ολόκληρης της θεωρίας.

Οπότε, το μοντέλο κάνει μία πολύ «τολμηρή» πρόβλεψη. Επειδή $0 + 0.008\text{eV} + 0.05\text{eV} \approx 0.06\text{eV}$ (σύμφωνα με τον Πίνακα 1), το συνολικό άθροισμα των μαζών είναι το ελάχιστο δυνατό που επιτρέπει η φύση, δηλαδή περίπου 0.06eV . Αν $m_1 > 0$, τότε το άθροισμα θα ήταν μεγαλύτερο (π.χ. 0.12eV ή παραπάνω). Όσο μεγαλύτερη είναι η συνολική μάζα, τόσο περισσότερα «σβήνονται» οι μικρές δομές στο Σύμπαν. Τα τηλεσκόπια CMB (όπως το Planck ή το επερχόμενο Simons Observatory) μετρούν αυτό το «σβήσιμο».

Τι βλέπουμε σήμερα; Προς το παρόν το επίγειο πείραμα KATRIN στη Γερμανία δίνει ένα άνω όριο των 0.8eV για τη μάζα του ν_{L1} (KATRIN Collaboration, 2022). Οι τελευταίες μετρήσεις από τον δορυφόρο Planck θέτουν ένα άνω όριο στο άθροισμα των μαζών γύρω στα 0.12eV . Είμαστε σε μια φάση όπου τα δεδομένα «πιέζουν» τις τιμές προς τα κάτω. Αν οι μελλοντικές μετρήσεις δείξουν ότι το άθροισμα είναι ακριβώς 0.06eV , θα είναι μια τεράστια νίκη για το CPT μοντέλο. Ενώ, αν η συνολική μέτρηση δείξει ένα νούμερο κοντά στο 0.1eV το μοντέλο αυτό θα εγκαταλειφθεί ή θα αναμορφωθεί ριζικά.

Στα επόμενα χρόνια, πειράματα όπως το Euclid και το CMB-S4 θα έχουν την ακρίβεια να μετρήσουν τη μάζα των νετρίνων με σφάλμα μικρότερο από 0.02eV . Είναι μια από τις σπάνιες στιγμές στη φυσική που μια τόσο βαθιά θεωρητική ιδέα, όπως η CPT συμμετρία, κρέμεται από μια τόσο συγκεκριμένη αριθμητική τιμή.

3.4 Συσχέτιση με το ισχυρό CP πρόβλημα και το «βέλος» του χρόνου

Να ξαναθυμηθούμε ότι, στην παραδοσιακή κοσμολογία (Λ CDM με πληθωρισμό), η CPT συμμετρία αντιμετωπίζεται συχνά ως μια συμμετρία που ισχύει για τους νόμους της φυσικής τοπικά, αλλά παραβιάζεται παγκόσμια από την ίδια την εξέλιξη του Σύμπαντος. Το Big Bang θεωρείται μια «ακμή», ένα κάτω σύνορο (boundary), του χωροχρόνου. Το σύμπαν ξεκινά από το $t=0$ και επεκτείνεται. Αυτή η γεωμετρία από μόνη της ορίζει ένα προτιμώμενο βέλος χρόνου, σπάζοντας τη συμμετρία T (και άρα τη CPT) σε κοσμικό επίπεδο. Επίσης, στο καθιερωμένο μοντέλο, πρέπει να υπάρξει μια διαδικασία (βαρυογένεση) η οποία παραβιάζει τις συνθήκες Sakharov (συμπεριλαμβανομένης της παραβίασης CP) για να προκύψει περισσότερη ύλη από

αντιύλη. Αντίστοιχα, τα περισσότερα κοσμολογικά μοντέλα υποθέτουν ότι οι αρχικές συνθήκες ή κάποιο πεδίο (όπως το Inflaton) παραβιάζουν τη συμμετρία για να δικαιολογήσουν την ομοιογένεια και την παρατηρούμενη επιπεδότητα ($\Omega \approx 1$) σε κοσμολογική κλίμακα. Το μοντέλο του CPT-συμμετρικού σύμπαντος αρνείται την ύπαρξη αυτής της αυθόρμητης παραβίασης. Αντίθετα, επιβάλλει την CPT ως συνοριακή συνθήκη σε όλη την ιστορία του χωροχρόνου (Boyle et al., 2018). Όλη η ουσία της παρούσας μελέτης συμπυκνώνεται σε αυτή την παράγραφο.

Σε ένα κλασικό διαστελλόμενο σύμπαν, δεν υπάρχει μοναδικό κβαντικό κενό (το κενό «In» διαφέρει από το «Out»). Στο CPT μοντέλο, η απαίτηση η κβαντική κατάσταση $|\Psi\rangle$ να είναι CPT-αναλλοίωτη, δίνει την παρακάτω συνθήκη:

$$\hat{\theta} |\Psi\rangle = |\Psi\rangle \quad (3.20)$$

(όπου $\hat{\theta}$ ο τελεστής CPT) επιλέγει μια μοναδική κατάσταση κενού. Η σχέση (3.20) επιβάλλει ότι η κβαντική κατάσταση του σύμπαντος $|\Psi\rangle$ είναι ιδιοκατάσταση του $\hat{\theta}$.

Χαρακτηριστικό	Καθιερωμένο Μοντέλο (Παραβιάζει CPT)	CPT Συμμετρικό Μοντέλο
Αρχή του Χρόνου	Μοναδικό σημείο $t=0$ (Singularity).	$t=0$ είναι σημείο αναπήδησης/ανάκλασης (Bounce/Mirror).
Βέλος Χρόνου	Επιβάλλεται από εξαιρετικά χαμηλή αρχική εντροπία.	Προκύπτει από τη γεωμετρία: η εντροπία αυξάνεται μακριά από το $t=0$ και προς τις δύο κατευθύνσεις.
Ύλη vs Αντιύλη	Πλεόνασμα ύλης παντού.	Ύλη για $t>0$, Αντιύλη για $t<0$ (Συνολικά μηδέν).
Σκοτεινή Ύλη	Νέα σωματίδια (WIMPs, Axions).	Δεξιόστροφα νετρίνα που προκύπτουν από το CPT κενό.

Πίνακας 2: Βασικές διαφορές του κλασικού Κοσμολογικού μοντέλου, που παραβιάζει τη CPT συμμετρία και του CPT Συμμετρικού μοντέλου.

Αυτή η επιλογή εξαλείφει τις ελευθερίες που συνήθως οδηγούν στο ισχυρό CP πρόβλημα, καθώς η φάση θ της QCD περιορίζεται από τη συμμετρία του υποβάθρου (Boyle, 2022). Αν θέλουμε να συγκρίνουμε το κλασσικό Κοσμολογικό μοντέλο του Καθιερωμένου Προτύπου (το οποίο παραβιάζει τη CPT) με το CPT Συμμετρικό μοντέλο, ο Πίνακας 2 μας παρουσιάζει συγκεντρωτικά 4 χαρακτηριστικές διαφορές, τις οποίες συναντήσαμε στη μέχρι τώρα ανάλυσή μας.

Στα μοντέλα παραβίασης, η παράμετρος θ_{QCD} πρέπει να ρυθμιστεί τεχνητά (fine-tuning) ή να εισαχθεί το πεδίο axion. Στο CPT-συμμετρικό σύμπαν, η παγκόσμια CPT συμμετρία επιβάλλει $\theta_{QCD}=0$ στην κατάσταση κενού, επειδή ο τελεστής T (χρονική αντιστροφή) αλλάζει το πρόσημο του όρου $F\tilde{F}$ στη δράση της QCD. Αν το σύμπαν είναι παγκόσμια CPT-αναλλοίωτο, ο όρος αυτός πρέπει να μηδενίζεται (Boyle et al., 2018; Boyle et al., 2022; Boyle et al., 2024).

Αναλυτικότερα, στο συγκεκριμένο μοντέλο (CPT-Symmetric Universe), ο $\hat{\theta}$ δεν είναι απλώς μια μαθηματική ιδιότητα των σωματιδίων, αλλά μια γεωμετρική συμμετρία ολόκληρου του χωροχρόνου. Η μαθηματική αναπαράσταση του τελεστή είναι σύνθετη, διότι δεν είναι ένας απλός γραμμικός τελεστής, αλλά ένας αντι-γραμμικός (anti-unitary) τελεστής. Στο πλαίσιο της Κβαντικής Θεωρίας Πεδίου (QFT) και του μοντέλου των Boyle & Turok, η δράση του σε ένα βαθμωτό πεδίο $\phi(x)$ ορίζεται ως εξής:

$$\hat{\theta}\phi(t, x)\hat{\theta}^{-1} = n\phi^{\dagger}(-t, -x) \quad (3.21)$$

όπου $t \rightarrow -t$ η αντιστροφή του χρόνου (T), $x \rightarrow -x$, η χωρική ανάκλαση/ομοτιμία (P) και $\phi \rightarrow \phi^{\dagger}$ η συζυγία φορτίου (C), που μετατρέπει το πεδίο στο ερμιτιανό συζυγές του (σωματίδιο σε αντισωματίδιο). Η τιμή n αντιπροσωπεύει μία φάση με τιμή 1 ή -1, συνήθως. Ο $\hat{\theta}$ περιλαμβάνει τον τελεστή αντιστροφής χρόνου, ο οποίος στη μαθηματική φυσική ορίζεται ως αντι-μοναδιαίος. Αυτό σημαίνει ότι όταν δρα πάνω σε μιγαδικούς αριθμούς (βαθμωτά), παίρνει το συζυγές τους:

$$\hat{\theta}(\alpha |\Psi\rangle + \beta |\Psi\rangle) = \alpha^* \hat{\theta} |\Psi\rangle + \beta^* \hat{\theta} |\Psi\rangle \quad (3.22)$$

Αυτή η ιδιότητα είναι «κλειδί» για τη λύση του ισχυρού CP προβλήματος, διότι η παράμετρος θ της QCD εμφανίζεται στη δράση ως ένας μιγαδικός όρος. Η απαίτηση

για αναλλοιοτότητα υπό $\hat{\Theta}$ αναγκάζει αυτούς τους μιγαδικούς όρους να ακυρωθούν ή να μηδενιστούν.

Ο όρος θ στον οποίο αναφερθήκαμε, εμφανίζεται στη δράση S της QCD, σύμφωνα με τη σχέση:

$$S_{\theta} = \theta \int dx^4 \frac{g^2}{32\pi^2} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \quad (3.23)$$

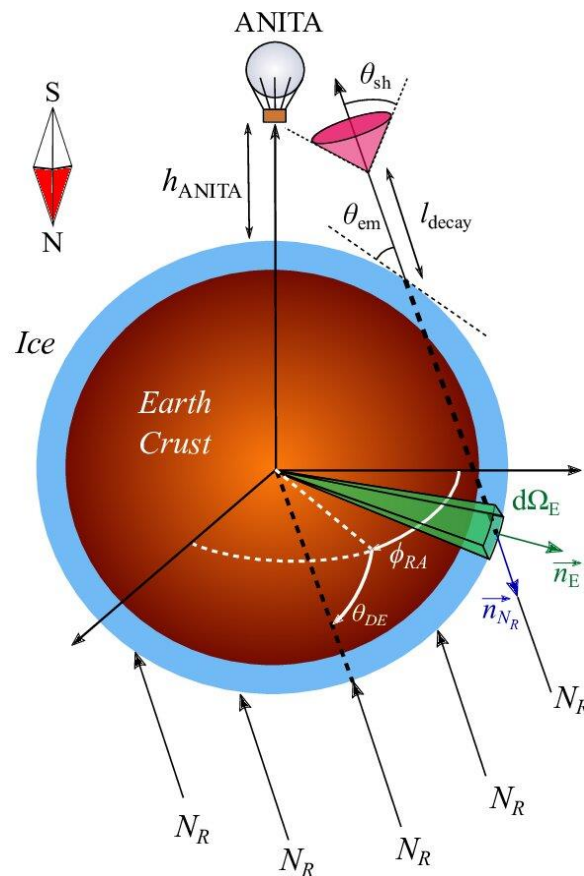
Αν το σύμπαν μας είναι παγκόσμια CPT-αναλλοίωτο, η συνολική δράση πρέπει να παραμένει η ίδια υπό την εφαρμογή του τελεστή $\hat{\Theta}$ (CPT). Ο τελεστής CPT περιλαμβάνει την αντιστροφή χρόνου (T). Ο T αλλάζει το πρόσημο του $F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$. Για να παραμείνει η θεωρία αναλλοίωτη (δηλαδή να μην αλλάξει η φυσική του συστήματος), η μόνη μαθηματικά συνεπής λύση στην κβαντική κατάσταση κενού $|\Psi\rangle$ είναι η παράμετρος θ να είναι μηδέν.

Το συμπέρασμα είναι ότι στο μοντέλο αυτό, το $\theta=0$ δεν είναι μια «σύμπτωση» ή αποτέλεσμα κάποιου πεδίου (axion), αλλά γεωμετρική αναγκαιότητα. Αν το θ ήταν οτιδήποτε άλλο εκτός από μηδέν, το σύμπαν δεν θα μπορούσε να είναι ο «καθρέφτης» του εαυτού του μέσω του Big Bang.

3.5 Το πείραμα ANITA και οι ενδείξεις για την ύπαρξη του συμμετρικού CPT σύμπαντος

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να δούμε αναλυτικότερα την πιθανή συσχέτιση του πειράματος ANITA με στοιχεία ένδειξης για την επαλήθευση του CPT μοντέλου. Τα δεδομένα από το πείραμα ANITA (Antarctic Impulsive Transient Antenna) στην Ανταρκτική έχουν προκαλέσει έντονες συζητήσεις στην επιστημονική κοινότητα. Η ανίχνευση «ανώμαλων» γεγονότων —υπερυψηλής ενέργειας σωματιδίων που φαίνονται να αναδύονται μέσα από τη Γη— έρχεται σε σύγκρουση με τις προβλέψεις του Καθιερωμένου Προτύπου (Standard Model). Μια από τις πιο τολμηρές ερμηνείες αυτών των φαινομένων προέρχεται από το μοντέλο του «Συμμετρικού CPT Σύμπαντος», το οποίο προτείνουν οι Latham Boyle και Neil Turok. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, το Big Bang δεν ήταν μόνο η αρχή του δικού μας κόσμου, αλλά το σημείο καθρέφτισμα ενός «αντισύμπαντος», όπου ο χρόνος ρέει αντίστροφα και η συμμετρία φορτίου (C), ισοτιμίας (P) και χρόνου (T) διατηρείται συνολικά (Boyle et

al., 2018). Ας δούμε λίγο καλύτερα το πείραμα για να καταλάβουμε γιατί υπάρχουν αυτές οι «ανωμαλίες».



Εικόνα 2: Μία εικόνα προσομοίωσης του πειράματος ANITA, όπου N_R τα εισερχόμενα δεξιόστροφα νεutrίνο. Οι γωνίες ϑ_{DE} και φ_{RA} αντιστοιχούν στη ροή των εισερχόμενων νεutrίνων. Η γωνία ϑ_{em} είναι η γωνία του αναδυσόμενου σωματιδίου τ , η οποία σχηματίζεται μεταξύ της κατεύθυνσης διάδοσης και του επαπτόμενου επιπέδου στη Γη στο σημείο όπου το τ εξέρχεται από τη Γη. Η γωνία ϑ_{sh} είναι η γωνία του πίδακα που σχηματίζεται κατά τη διάσπαση του τ , στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας.

(Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-the-ANITA-experiment-and-useful-notations-for-our-simulation-understanding_fig1_331087175).

Το πείραμα ANITA είναι ένα όργανο της NASA που αποτελείται από μια σειρά ραδιοκεραιών, οι οποίες μεταφέρονται από ένα αερόστατο ηλίου σε υψόμετρο περίπου 35-40 χιλιομέτρων πάνω από την παγωμένη ήπειρο της Ανταρκτικής (βλ. εικόνα 2). Ο κύριος στόχος του ANITA είναι η ανίχνευση κοσμικών νετρίνων υπερυψηλής ενέργειας (UHE). Όταν ένα τέτοιο νεutrino προσκρούει στον πάγο της Ανταρκτικής, αλληλοεπιδρά με τους πυρήνες των ατόμων, δημιουργώντας έναν

καταιγισμό δευτερογενών φορτισμένων σωματιδίων. Αυτός ο καταιγισμός κινείται ταχύτερα από την ταχύτητα του φωτός μέσα στο μέσο (πάγος), προκαλώντας την εκπομπή ραδιοκυμάτων μέσω του φαινομένου Askaryan (Anchordoqui & Antoniadis, 2019).

Το ANITA είναι σχεδιασμένο να ανιχνεύει δύο τύπους σημάτων. Τα άμεσα σήματα που προέρχονται από ραδιοεκπομπές λόγω αλληλεπιδράσεων των νετρίνων με τον πάγο και τα ανακλώμενα σήματα, τα οποία οφείλονται στις κοσμικές ακτίνες που έρχονται από τον ουρανό. Αυτές προσκρούουν στον πάγο και ανακλώνται προς το αερόστατο. Η κρίσιμη διαφορά μεταξύ των δύο είναι η πόλωση του σήματος. Κατά την ανάκλαση, η πόλωση του ραδιοκύματος αντιστρέφεται (φάση 180°). Αυτό επιτρέπει στους επιστήμονες να διακρίνουν αν ένα σωματίδιο ήρθε από «πάνω» (ουρανός) ή από «κάτω» (μέσα από τον πάγο).

Όμως, κατά τη διάρκεια των πτήσεων ANITA-I και ANITA-III, το όργανο κατέγραψε δύο γεγονότα που δεν θα έπρεπε να υπάρχουν σύμφωνα με τη γνωστή φυσική. Ανιχνεύθηκαν καταιγισμοί σωματιδίων με ενέργειες κοντά στα 0.6 EeV ($1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$). Συγκεκριμένα ανίχνευσαν δύο ασυνήθιστα γεγονότα ανοδικών πιδάκων σωματιδίων με ενέργειες $0.6 \cdot 10^{18} \text{ eV} \pm 0.4 \cdot 10^{18} \text{ eV}$ και $0.56 \cdot 10^{18} \text{ eV} \pm 0.3 \cdot 10^{18} \text{ eV}$, οι οποίοι είχαν πόλωση που υποδείκνυε ότι τα σωματίδια δεν είχαν ανακλαστεί, αλλά είχαν αναδυθεί απευθείας από το εσωτερικό της Γης (Anchordoqui et al., 2018).

Το παράδοξο της διαδρομής έγκειται στην ερμηνεία από το Καθιερωμένο Πρότυπο. Τα νετρίνα με τόσο υψηλή ενέργεια έχουν πολύ μεγάλη «διατομή αλληλεπίδρασης». Αυτό σημαίνει ότι η Γη είναι «ορατή» και αδιαφανής για αυτά. Η πιθανότητα ένα νετρίνο αυτής της ενέργειας να διασχίσει χιλιάδες χιλιόμετρα γήινης μάζας χωρίς να συγκρουστεί και να απορροφηθεί είναι μικρότερη από 1 στις 10.000 (Anchordoqui et al., 2018). Παρόλα αυτά, το ANITA είδε σωματίδια να βγαίνουν από το έδαφος σε γωνίες που απαιτούσαν μακρινή διαδρομή μέσα από τον πλανήτη.

Πώς όμως το CPT σύμπαν εξηγεί τα ανοδικά σήματα στην Ανταρκτική; Η –πιθανή– απάντηση βρίσκεται στη διάσπαση της σκοτεινής ύλης. Σύμφωνα με τους Anchordoqui et al. (2018), αν η Γη έχει παγιδεύσει στο εσωτερικό της αυτά τα βαρέα δεξιόστροφα νετρίνα (σκοτεινή ύλη), αυτά μπορούν περιστασιακά να διασπώνται. Η διάσπαση ενός τέτοιου σωματιδίου (μάζας $\sim 480 \text{ PeV}$) παράγει, ένα μποζόνιο Higgs

και ένα ελαφρύ νεutrino Majorana (όπως είδαμε στην εξίσωση (3.14)). Το ελαφρύ νεutrino που παράγεται μέσα στη Γη, κοντά στην επιφάνεια, αλληλοεπιδρά με τον φλοιό και παράγει ένα λεπτόνιο τ . Αυτό το σωματίδιο τ εξέρχεται από το έδαφος, διασπάται στην ατμόσφαιρα και δημιουργεί τον ραδιοφωνικό παλμό που κατέγραψε το ANITA. Επειδή η πηγή (το δεξιόστροφο νεutrino) είναι ήδη μέσα στη Γη, το πρόβλημα της απορρόφησης κατά τη διαδρομή επιλύεται (Anchordoqui et al., 2018).

Παρά την κομψότητα της θεωρίας, υπάρχουν αμφισβητήσεις. Άλλοι ερευνητές προτείνουν ότι τα γεγονότα του ANITA μπορεί να οφείλονται σε άγνωστες ιδιότητες του πάγου ή σε πιο συμβατικές υπερσυμμετρικές μεταβάσεις (Anchordoqui & Antoniadis, 2019). Επιπλέον, πρόσφατα αποτελέσματα από το πείραμα IceCube δεν έχουν επιβεβαιώσει πλήρως τον ρυθμό ανίχνευσης που θα αναμενόταν από το μοντέλο του ANITA.

Ωστόσο, η θεωρία των Boyle και Turok παραμένει η μοναδική που συνδέει ένα πειραματικό «παράδοξο» (ANITA) με μια θεμελιώδη αναθεώρηση της κοσμολογίας (CPT Symmetry). Παρόλα αυτά πειράματα όπως το ALPHA-g δεν επιβεβαίωσαν τις απωστικές ιδιότητες της αντιύλης όπως αρχικά θεώρησαν υποστηρικτές αυτού του κοσμολογικού μοντέλου. Σύμφωνα με άλλους ερευνητές η θεωρία του CPT Συμμετρικού σύμπαντος πρέπει να αναθεωρηθεί (Villata, 2024). Αυτό θα είναι το αντικείμενο της μελέτης του τελευταίου κεφαλαίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Το Πείραμα Alpha-g και η προτεινόμενη αναθεώρηση του CPT συμμετρικού μοντέλου

Η σχέση του πειράματος ALPHA-g με τη θεωρία του CPT Συμμετρικού Σύμπαντος είναι περίπλοκη και, στην πραγματικότητα, τα πρώτα αποτελέσματα του ALPHA-g έθεσαν κάποιες προκλήσεις στη συγκεκριμένη θεωρία, αναγκάζοντας τους επιστήμονες, οι οποίοι υποστηρίζουν την εν λόγω προσέγγιση, να επανεξετάσουν ορισμένες παραδοχές. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε ποιες ήταν οι προτεινόμενες κοσμολογικές θεωρήσεις για τη κοσμολογική διαστολή και ποιες οι προτεινόμενες αναθεωρήσεις, σύμφωνα με τα τρέχοντα πειραματικά δεδομένα.

4.1 Η άπωση ύλης και αντιύλης στη θεωρία της CPT βαρύτητας ως υποψήφιος της επιταχυνόμενης κοσμολογικής διαστολής

Το μοντέλο του CPT-συμμετρικού σύμπαντος που συζητήσαμε παρουσιάζει τη Μεγάλη Έκρηξη ως ένα σημείο κατοπτρικής συμμετρίας. Ένα ακόμα κεντρικό σημείο της ανάλυσης είναι ότι η θεωρία της CPT βαρύτητας προτείνει το φαινόμενο της βαρυτικής άπωσης μεταξύ ύλης και αντιύλης (ή μεταξύ των δύο συμμετρικών χωροχρόνων όπως θα δούμε στη συνέχεια). Με αυτό τον τρόπο μπορεί να εξηγήσει την επιταχυνόμενη διαστολή του σύμπαντος χωρίς την ανάγκη εισαγωγής της σκοτεινής ενέργειας. Το αιτιολογούμε άμεσα.

Το καθιερωμένο κοσμολογικό μοντέλο (Λ CDM) βασίζεται στην παραδοχή ότι το σύμπαν κυριαρχείται από τη σκοτεινή ενέργεια (Λ), η οποία προκαλεί την επιταχυνόμενη διαστολή. Ωστόσο, η φύση της Λ παραμένει άγνωστη, προκαλώντας θεωρητικά αδιέξοδα. Οι Boyle και Turok (2018) πρότειναν μια ριζοσπαστική εναλλακτική: το σύμπαν δεν παραβιάζει αυθόρμητα τη συμμετρία CPT. Αντίθετα, η Μεγάλη Έκρηξη είναι μια «διπλή» υπέρ-επιφάνεια από την οποία αναδύεται ένα ζεύγος συμπάντων, το ένα αποτελώντας την CPT εικόνα του άλλου (Boyle et al., 2018; Boyle et al., 2022). Οι Boyle και Turok (2021) περιγράφουν τον χωρόχρονο ως μια δομή δύο φύλλων. Το «δικό μας» φύλλο διαστέλλεται προς τα εμπρός στο χρόνο, ενώ το «συζυγές» CPT-σύμπαν διαστέλλεται «προς τα πίσω» από το ίδιο σημείο μηδέν.

Αυτή η γεωμετρία δημιουργεί μια φυσική τάση απομάκρυνσης των δύο χωροχρονικών περιοχών.

Οπότε η πιο τολμηρή υπόθεση (ή αν προτιμάμε εύλογη παραδοχή), αυτού του μοντέλου, είναι η υπόθεση ότι η βαρύτητα υπακούει στη συμμετρία CPT με τρόπο που οδηγεί σε απωστικές δυνάμεις. Ο Massimo Villata (2024) υποστηρίζει ότι αν συνδυάσουμε τη Γενική Σχετικότητα με τη συμμετρία CPT, η αλληλεπίδραση μεταξύ ύλης και της CPT-μετασχηματισμένης αντιύλης είναι απωστική. Αν η ύλη στο ένα φύλλο αλληλοεπιδρά απωστικά με την ύλη (που για εμάς φαίνεται ως αντιύλη) στο άλλο φύλλο, τότε η επιταχυνόμενη διαστολή που παρατηρούμε δεν οφείλεται σε μια μυστηριώδη σκοτεινή ενέργεια, αλλά στη βαρυτική πίεση που ασκεί το CPT-αντισύμπαν (Fiscaletti et al., 2022). Με αυτό τον τρόπο η άπωση παρέχει την απαραίτητη «αρνητική πίεση» για τη διαστολή και το βέλος του χρόνου «δείχνει» μακριά από τη Μεγάλη Έκρηξη και στα δύο φύλλα, εξηγώντας την εντροπική αύξηση χωρίς την ανάγκη για ειδικές αρχικές συνθήκες (Boyle et al., 2021).

Για να κατανοήσουμε μαθηματικά την άπωση μεταξύ των δύο CPT-συμμετρικών συμπάντων, πρέπει να εξετάσουμε πώς ο μετασχηματισμός CPT επιδρά στις εξισώσεις της βαρύτητας (Villata, 2024; Boyle et al., 2018; Boyle et al., 2021).

Στη Γενική Σχετικότητα, η γεωμετρία καθορίζεται από τον μετρικό τανυστή $g_{\mu\nu}$. Ο μετασχηματισμός CPT αντιστοιχεί σε μια πλήρη ανακλαστική συμμετρία του χωροχρόνου $x^\mu \rightarrow -x^\mu$. Για το κατοπτρικό σύμπαν, η μετρική $g'_{\mu\nu}$ συνδέεται με τη δική μας $g_{\mu\nu}$, μέσω της σχέσης:

$$g'_{\mu\nu}(-x) = g_{\mu\nu}(x) \quad (4.1)$$

Η βαρυτική αλληλεπίδραση εξαρτάται από τα σύμβολα Christoffel $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$. Ο Villata (2024) δείχνει ότι υπό τον μετασχηματισμό PT, οι παράγωγοι της μετρικής αλλάζουν πρόσημο:

$$\Gamma_{\mu\nu}^\lambda = \frac{1}{2} g^{\lambda\sigma} (\partial_\nu g_{\sigma\mu} + \partial_\mu g_{\sigma\nu} - \partial_\sigma g_{\mu\nu}) \quad (4.2)$$

Επειδή $\partial_\mu = \frac{\partial}{\partial x^\mu}$, αν $x^\mu \rightarrow -x^\mu$, τότε $\partial_\mu \rightarrow -\partial_\mu$. Συνεπώς, για την ύλη που ανήκει στον CPT-ανεστραμμένο χωρόχρονο:

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = -\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} \quad (4.3)$$

Στη Γενική Σχετικότητα, η κίνηση ενός σωματιδίου (ή ενός «φύλλου» του σύμπαντος) περιγράφεται από την εξίσωση της γεωδαιτικής:

$$\frac{d^2 x^\mu}{ds^2} + \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} \left(\frac{dx^\alpha}{ds} \cdot \frac{dx^\beta}{ds} \right) = 0 \quad (4.4)$$

Εδώ, όρος $\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$ είναι τα σύμβολα Christoffel, τα οποία εξαρτώνται από τη μετρική $g_{\mu\nu}$ και τις παραγώγους της, όπως είδαμε στην (4.2). Στο δικό μας «φύλλο» του σύμπαντος, αυτός ο όρος οδηγεί στην έλξη

Σύμφωνα με το σκεπτικό που περιγράψαμε, όταν περνάμε στον CPT-ανεστραμμένο χωρόχρονο, η σύζευξη της ύλης με τη γεωμετρία αλλάζει. Αν θεωρήσουμε ότι η ύλη του «άλλου» φύλλου επηρεάζεται από μια «αντίστροφη» γεωμετρία (ή ότι η μετρική που «αισθάνεται» έχει υποστεί μετασχηματισμό), η εξίσωση της κίνησης μεταβάλλεται. Στη μαθηματική έκφραση (4.4), αντικαθιστούμε από την (4.3), οπότε η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$\frac{d^2 x^\mu}{ds^2} - \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} \left(\frac{dx^\alpha}{ds} \cdot \frac{dx^\beta}{ds} \right) = 0 \quad (4.5)$$

Αυτή η αλλαγή του προσήμου από + σε -, από την (4.4) στην (4.5) αντίστοιχα, είναι η καθαρή μαθηματική έκφραση της βαρυτικής άπωσης. Ενώ στη Γενική Σχετικότητα η καμπυλότητα «έλκει» τα σώματα προς τις μάζες, εδώ η καμπυλότητα του ενός χωροχρονικού «φύλλου» απωθεί την ύλη του άλλου.

Στις εξισώσεις πεδίου του Αϊνστάιν, στο CPT-συμμετρικό μοντέλο, ο ταυιστής $T_{\mu\nu}$ για το συνολικό σύστημα των δύο συμπάντων πρέπει να διατηρεί τη συμμετρία. Η ενέργεια κενού ρ_{vac} η οποία προκύπτει από τους κβαντικούς υπολογισμούς των Boyle

και Turok (2022) συνδέεται με την Weyl ανωμαλία και τη συνολική εντροπία από τη σχέση:

$$S_g \sim S_\Lambda^{1/4} S_r \quad (4.6)$$

όπου η πυκνότητα ενέργειας του κενού ρ_{vac} βρίσκεται μέσα στον όρο S_Λ , ο οποίος εκφράζει τη συνεισφορά της εντροπίας που σχετίζεται με την κοσμολογική σταθερά Λ (δηλαδή την ενέργεια του κενού). Η εντροπία S_Λ είναι αντιστρόφως ανάλογη της πυκνότητας του κενού. Το κρίσιμο σημείο στην εργασία των Boyle-Turok είναι ότι η πυκνότητα του κενού δεν είναι αυθαίρετη, αλλά καθορίζεται από τη συνολική εντροπία των πεδίων του Σύμπαντος. Αντί η πυκνότητα του κενού να είναι μια τεράστια τιμή (όπως προβλέπει η παραδοσιακή Κβαντική Θεωρία Πεδίου - το πρόβλημα των 120 τάξεων μεγέθους), οι Boyle-Turok δείχνουν ότι η τιμή της ρ_{vac} «επιλέγεται» από το σύμπαν έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική εντροπία. Με άλλα λόγια η πυκνότητα του κενού είναι τόσο μικρή όσο μας δείχνουν τα παρατηρησιακά δεδομένα διότι αυτή η συγκεκριμένη τιμή επιτρέπει στο σύμπαν να έχει τη μέγιστη δυνατή στατιστική πιθανότητα (εντροπία) λαμβάνοντας υπόψη την Weyl ανωμαλία στο Big Bang.

Η μαθηματική συνέπεια της (4.6) είναι ότι η «πίεση» P που ασκείται μεταξύ των δύο συμπάντων ικανοποιεί την κατάσταση:

$$P = -\rho c^2 \quad (4.7)$$

Αυτή η αρνητική πίεση, σύμφωνα με τη Γενική Σχετικότητα, προκαλεί επιτάχυνση. Δεν εισάγεται ως «σκοτεινή ενέργεια», αλλά προκύπτει ως η γεωμετρική αντίδραση της άπωσης των δύο CPT-συζυγών χωροχρόνων. Καθώς το ένα σύμπαν «πιέζει» το άλλο λόγω της CPT αντιστροφής, ο χωρόχρονος αναγκάζεται να διασταλεί επιταχυνόμενα.

Όλα αυτά είναι πολύ ενδιαφέροντα και δίνουν μία απλή εξήγηση για την επιταχυνόμενη κοσμολογική διαστολή, χωρίς την ανάγκη εισαγωγής της σκοτεινής ενέργειας, όπως προαναφέραμε. Αρκεί, να θεωρήσουμε ότι η ύλη απωθείται από την αντιύλη. Ή μήπως όχι; Φαινομενικά το πείραμα Alpha-g μοιάζει να καταρρίπτει τον ισχυρισμό περί άπωσης μεταξύ ύλης και αντιύλης. Θα δούμε στη συνέχεια

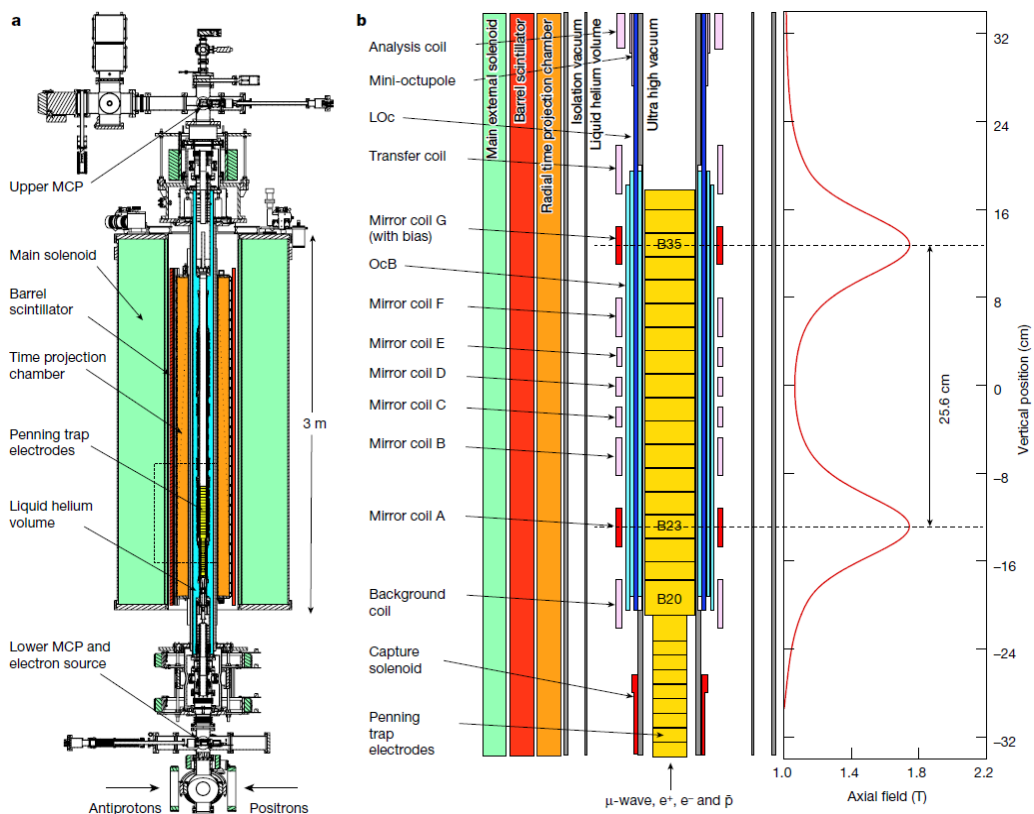
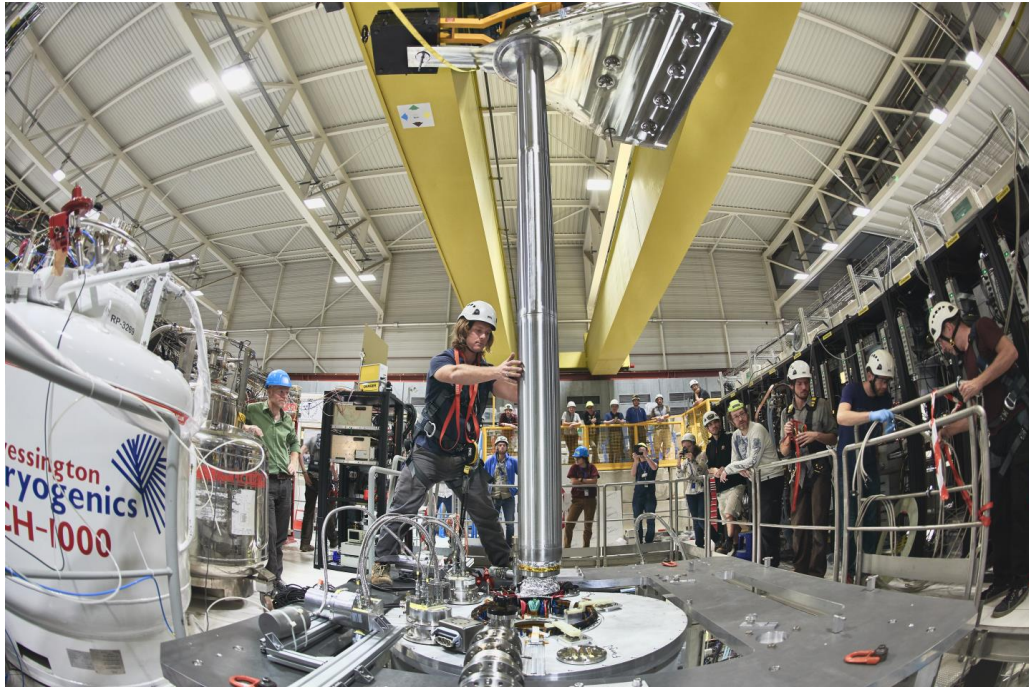
αναλυτικότερα το πείραμα και τα αποτελέσματά του. Επίσης, θα δούμε ότι παρά τα αποτελέσματα του ALPHA-g, η ιδέα της άπωσης μεταξύ των δύο «φύλλων» του σύμπαντος παραμένει ένας ισχυρός υποψήφιος για την κατανόηση της μεγάλης κλίμακας δομής του κόσμου μας. Σύμφωνα με τον Villata (2024), τα αποτελέσματα του πειράματος ALPHA-g επαναπροσδιορίζουν, αλλά δεν ακυρώνουν, την υπόθεση της κοσμολογικής άπωσης.

4.2 Το πείραμα ALPHA-g και η φαινομενική(;) απόρριψη του ισχυρισμού της άπωσης ύλης-αντιύλης

Το πείραμα ALPHA-g (Antihydrogen Laser Physics Apparatus - Gravity) στο CERN αποτελεί έναν από τους πιο φιλόδοξους σταθμούς στη σύγχρονη φυσική, επιχειρώντας να απαντήσει σε ένα θεμελιώδες ερώτημα: Υπακούει η αντιύλη στην Αρχή της Ισοδυναμίας του Αϊνστάιν ή μήπως η βαρύτητα την επηρεάζει διαφορετικά; Συγκεκριμένα, εξετάζει αν το αντιυδρογόνο πέφτει «προς τα κάτω» με την ίδια επιτάχυνση όπως η κανονική ύλη (Anderson, E. K., et al., 2023; CERN, 2023).

Η πειραματική διαδικασία ξεκινάει με τη δημιουργία του αντιυδρογόνου (Antihydrogen Synthesis). Στο κέντρο της διάταξης, δέσμες αντιπρωτονίων από τον επιβραδυντή ELENA (Extra Low Energy Antiproton) ψύχονται και επιβραδύνονται, προτού αναμειχθούν με ποζιτρόνια μέσα σε μια σύνθετη ηλεκτρομαγνητική παγίδα (Penning-Malmberg Traps). Το αποτέλεσμα είναι η σύνθεση ατόμων αντιυδρογόνου, τα οποία είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Αυτή η ουδετερότητα είναι κρίσιμη, καθώς επιτρέπει στους επιστήμονες να μελετήσουν τη βαρυτική τους συμπεριφορά χωρίς τις παρεμβολές των ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων τα οποία θα κυριαρχούσαν σε φορτισμένα σωματίδια.

Κατόπιν, ακολουθεί η φάση της μαγνητικής παγίδευσης. Επειδή η αντιύλη εξαϋλώνεται ακαριαία μόλις αγγίξει τα τοιχώματα της συσκευής (τα οποία αποτελούνται από ύλη), τα άτομα αντιυδρογόνου συγκρατούνται στο κενό μέσω ενός ισχυρού και εξαιρετικά ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου. Χρησιμοποιώντας υπεραγωγίμα πηνία, δημιουργείται μια μαγνητική «φιάλη» όπου το αντιυδρογόνο παγιδεύεται λόγω της μαγνητικής του ροπής. Η διάταξη του ALPHA-g είναι κατακόρυφη, ύψους αρκετών μέτρων, γεγονός που επιτρέπει στη βαρύτητα να δράσει κατά μήκος του άξονα της συσκευής (βλ. εικόνα 3).



Εικόνα 3: Η πρώτη εικόνα (επάνω φωτογραφία) απεικονίζει τη φάση συναρμολόγησης του πειράματος στον τομέα αντιύλης του CERN, αναδεικνύοντας την κατακόρυφη κλίμακα της συσκευής, ενώ το τεχνικό σχεδιάγραμμα (κάτω εικόνα) αποκαλύπτει την εσωτερική δομή και τα υποσυστήματα ελέγχου. Στην πάνω φωτογραφία, στον κατακόρυφο άξονα, διακρίνεται ο κεντρικός σωλήνας κενού που εκτείνεται καθ' ύψος, απαραίτητος για τη μέτρηση της

βαρυτικής επίδρασης. Στα αριστερά της εικόνας, διακρίνεται η μονάδα *Cryogenics*, η οποία είναι υπεύθυνη για την ψύξη των υπεραγωγίων μαγνητών σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν, επιτρέποντας τη δημιουργία των ισχυρών μαγνητικών πεδίων παγίδευσης. Στην κάτω εικόνα, η παραγωγή αντιυδρογόνου, στο κάτω μέρος της (Σχήμα α) απεικονίζει το μέρος όπου εισέρχονται τα αντιπρωτόνια και τα ποζιτρόνια, τα οποία οδηγούνται στις παγίδες *Penning* (*Penning traps*) για να συντεθούν σε άτομα αντιυδρογόνου. Στο μεγεθυμένο τμήμα (Σχήμα b) φαίνονται τα πηνία-κάτοπτρα (*mirror coils*) και το κύριο σωληνοειδές (*main solenoid*) τα οποία δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο «ελαχίστου» για τη συγκράτηση των ουδέτερων ατόμων. Το διάγραμμα στα δεξιά δείχνει την ένταση του αξονικού μαγνητικού πεδίου (*axial field*) σε σχέση με την κατακόρυφη θέση, απεικονίζοντας τις «κορυφές» οι οποίες λειτουργούν ως μαγνητικά φράγματα για την παγίδευση της αντιύλης. Ο εξωτερικός ανιχνευτής σπινθηρισμού (*barrel scintillator*) βοηθά στον χρονισμό των συμβάντων εκμηδένισης. Οι ανιχνευτές *MCP* (*Micro-Channel Plate*) χρησιμοποιούνται, ως διαγνωστικά συστήματα, για την καταγραφή των φορτισμένων σωματιδίων (e^- , e^+ , p , $\bar{p}$) κατά τις φάσεις ελέγχου του πειράματος (Πηγή πάνω εικόνας: CERN, 2023. Πηγή κάτω εικόνας: Anderson, E. K., et al. (ALPHA Collaboration), 2023).

Η καρδιά του πειράματος βρίσκεται στη φάση της ελεύθερης πτώσης. Οι επιστήμονες μειώνουν σταδιακά και με απόλυτο έλεγχο την ένταση των μαγνητικών πεδίων στα άκρα της παγίδας (πάνω και κάτω). Αν η αντιύλη συμπεριφέρεται όπως η ύλη, τα άτομα θα πρέπει να τείνουν να «διαρρέουν» από το κάτω μέρος της παγίδας λόγω της βαρυτικής έλξης της Γης. Αν όμως υπήρχε κάποια μορφή «αντι-βαρύτητας» ή διαφορά στην επιτάχυνση, η κατανομή των εξόδων θα ήταν διαφορετική.

Τέλος, η καταγραφή γίνεται μέσω ανιχνευτών εξαύλωσης (*Silicon Vertex Detector - SVD*). Μόλις ένα άτομο αντιυδρογόνου δραπετεύσει από τη μαγνητική παγίδα και προσκρούσει στα τοιχώματα, εξαϋλώνεται παράγοντας σωματίδια (κυρίως πιόνια). Ένας εξελιγμένος ανιχνευτής πυριτίου, που περιβάλλει τη συσκευή, εντοπίζει το ακριβές σημείο της έκρηξης. Συγκρίνοντας τον αριθμό των εξαυλώσεων στο πάνω μέρος σε σχέση με το κάτω, οι ερευνητές μπορούν να υπολογίσουν τη βαρυτική επιτάχυνση g για την αντιύλη (Anderson, E. K., et al., 2023).

Αν δεν υπήρχε βαρύτητα, τα αντιάτομα θα έβγαιναν 50-50 από πάνω και από κάτω λόγω τυχαίας κίνησης. Το αποτέλεσμα που έδωσε το πείραμα είναι ότι περίπου το

80% των ατόμων βγήκε από το κάτω μέρος. Αυτή η στατιστική διαφορά επιβεβαίωσε ότι η βαρύτητα της Γης έλκει την αντιύλη προς τα κάτω.

Στο πείραμα ALPHA-g, η μέτρηση δεν ήταν απλώς μια ποιοτική παρατήρηση («πέφτει» ή «δεν πέφτει»), αλλά και μία ποσοτική εκτίμηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας για το αντιυδρογόνο. Σύμφωνα με τη δημοσίευση στο Nature (2023), τα αποτελέσματα έδειξαν για την τιμή της επιτάχυνσης (g) την οποία αισθάνεται η αντιύλη (σε σχέση με την γνωστή επιτάχυνση της ύλης $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$), την τιμή των $0.75 \pm 0.13 \pm 0.16$ (σε μονάδες g). Αυτό σημαίνει ότι η αντιύλη «αισθάνεται» περίπου το 75% της βαρυτικής έλξης που αισθάνεται η κανονική ύλη, με ένα περιθώριο σφάλματος που καθιστά το αποτέλεσμα συμβατό με την τιμή $1g$ (δηλαδή την πλήρη ισοδυναμία βαρυτικής έλξης της αντιύλης). Το πείραμα απέκλεισε την «αντιβαρύτητα» (δηλαδή την επιτάχυνση $-1g$ προς τα πάνω) με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια. Η πιθανότητα το αντιυδρογόνο να πέφτει προς τα πάνω λόγω τύχης βρέθηκε ότι είναι πρακτικά μηδενική.

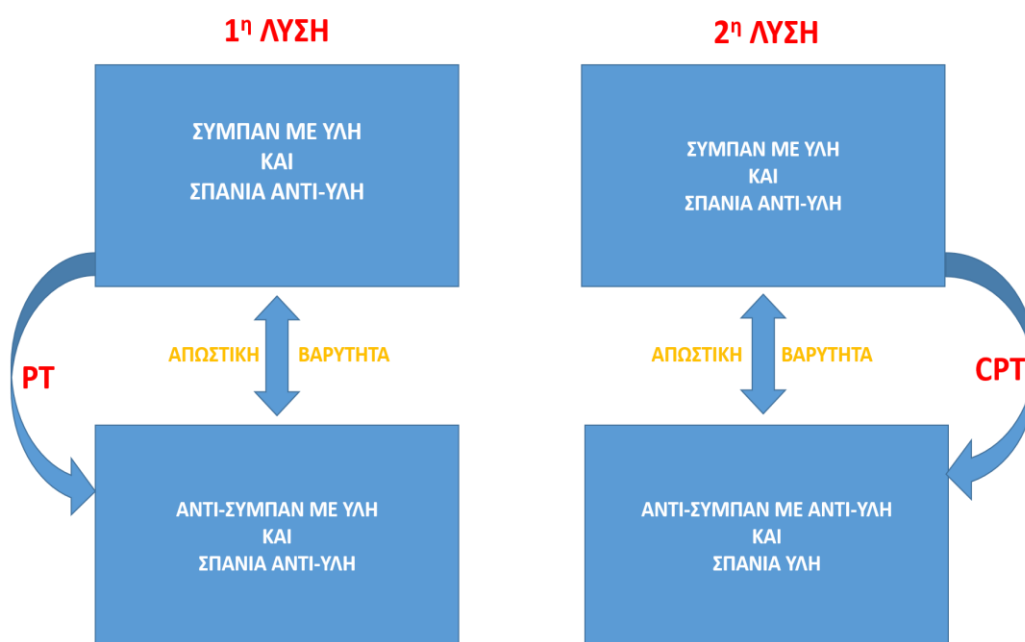
Μέχρι στιγμής, τα δεδομένα επιβεβαιώνουν ότι η αντιύλη όντως πέφτει «προς τα κάτω», ενισχύοντας την πεποίθηση ότι η βαρύτητα είναι καθολική, αν και η έρευνα συνεχίζεται για τον προσδιορισμό της ακριβούς τιμής αυτής της επιτάχυνσης. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με τα δεδομένα του ALPHA-g, η επιτάχυνση της βαρύτητας για το αντιυδρογόνο προσδιορίστηκε στο $0.75 \pm 0.29g$ (το συνδυασμένο σφάλμα της προηγούμενης παραγράφου). Μπορεί η τιμή αυτή να είναι συμβατή με την Ασθενή Αρχή της Ισοδυναμίας ($1g$), αλλά η απόκλιση και τα περιθώρια σφάλματος επιτρέπουν σε θεωρητικούς όπως ο Villata (2024) να υποστηρίζουν ότι η πλήρης εικόνα της συμμετρίας CPT στον χωρόχρονο δεν έχει ακόμη αποκαλυφθεί πλήρως. Η τιμή $0.75g$ (αν και στατιστικά κοντά στο $1g$) αφήνει ένα μικρό παράθυρο συζήτησης. Ο Villata και κάποιοι υποστηρικτές του CPT Συμμετρικού Σύμπαντος επισημαίνουν ότι αν η τιμή δεν είναι ακριβώς $1.00g$, τότε ίσως υπάρχει κάποια άγνωστη αλληλεπίδραση που δεν έχουμε κατανοήσει. Επιπρόσθετα, ο Villata (2024) ισχυρίζεται ότι η μέτρηση του ALPHA-g επηρεάζεται από το «περιβάλλον ύλης» της Γης. Αν το πείραμα γινόταν στο βαθύ διάστημα, μακριά από μεγάλες μάζες ύλης, η συμμετρία CPT θα προέβλεπε μια εντελώς διαφορετική συμπεριφορά, ίσως απωστική.

Αν το ALPHA-g επιβεβαιώσει στο μέλλον με απόλυτη ακρίβεια το $1g$, τότε η θεωρία του Villata για την απωστική βαρύτητα θα πρέπει να αναθεωρηθεί ριζικά, ενώ το αυτούσιο μοντέλο των Boyle/Turok (που δέχεται την ελκτική βαρύτητα αλλά σε ένα «αντίστροφο» σύμπαν) πρακτικά δεν επηρεάζεται. Ταυτόχρονα όμως θα χαθεί η «οικονομική» λύση της επιταχυνόμενης κοσμολογικής διαστολής μέσω της άπωσης των δύο συμπάντων, χωρίς την ανάγκη εισαγωγής του όρου Λ της σκοτεινής ενέργειας. Ή μήπως θα μπορούσε να υπάρχει μία εναλλακτική προσέγγιση; Θα δούμε στη συνέχεια την θεωρητική αιτιολόγηση όχι μίας, αλλά δύο εναλλακτικών προσεγγίσεων.

4.3 Δύο (ή τέσσερις) πιθανές λύσεις στο πρόβλημα της κοσμολογικής άπωσης ύλης-αντιύλης

Η μελέτη του Massimo Villata (2024) επιχειρεί να γεφυρώσει το χάσμα ανάμεσα στη θεωρία της βαρύτητας CPT, η οποία προβλέπει απωστική βαρύτητα μεταξύ ύλης και αντιύλης, και τα πρόσφατα πειραματικά δεδομένα του ALPHA-g στο CERN, τα οποία έδειξαν ότι το αντιυδρογόνο έλκεται από τη Γη.

Ο Villata προτείνει δύο τροποποιήσεις για να εξηγήσει γιατί το πείραμα ALPHA-g παρατήρησε έλξη, ενώ η κοσμολογική άπωση παραμένει αναγκαία για την εξήγηση της επιταχυνόμενης διαστολής του σύμπαντος (βλ. εικόνα 4).



Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση των δύο προτεινόμενων λύσεων διευθέτησης της «σύγκρουσης» μεταξύ της βαρύτητας CPT και των αποτελεσμάτων του πειράματος ALPHA-g. Στην πρώτη περίπτωση (αριστερά), η απωστική βαρύτητα μεγάλης κλίμακας προκύπτει από την αλληλεπίδραση με ύλη που έχει υποστεί μετασχηματισμό PT (και όχι από την αλληλεπίδραση με την αντιύλη), σε ένα αντι-Σύμπαν στο οποίο κυριαρχεί η ύλη. Στη δεύτερη περίπτωση (δεξιά), η συμμετρία CPT διατηρείται στο σύνολό της, προκαλώντας βαρυτική απώθηση μεταξύ ύλης και αντιύλης στα δύο Σύμπαντα. Ωστόσο, η ελάχιστη ποσότητα αντιύλης που βρίσκεται διάσπαρτη στον χωροχρόνο μας δεν μπορεί να υποστεί PT μετασχηματισμό (Δημιουργία εικόνας: Γιώργος Κουνδουράκης).

Η πρώτη πρόταση του Villata υποστηρίζει ότι η απωστική βαρύτητα είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης με έναν αντίστροφο χωρόχρονο, ο οποίος όμως δεν κατοικείται απαραίτητα από αντιύλη. Ο μηχανισμός, σε αυτή την προσέγγιση, βασίζεται στην παραδοχή ότι οι μετασχηματισμοί PT (χωροχρονικός) και C (φορτίου) δρουν χωριστά. Η βαρυτική άπωση προκύπτει μεταξύ περιοχών ύλης που βρίσκονται σε αντίθετους χωροχρόνους (1^η λύση στην εικόνα 4).

Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση ποια είναι η ερμηνεία του πειράματος ALPHA-g; Η αντιύλη που παράγεται στο CERN υπόκειται μόνο στον μετασχηματισμό C (φορτίου) και όχι στον PT (χωροχρονική αντιστροφή). Εφόσον η αντιύλη του εργαστηρίου «κατοικεί» στον δικό μας χωρόχρονο και ακολουθεί το δικό μας βέλος του χρόνου, δεν υπάρχει λόγος να εμφανίζει άπωση. Οπότε ως άμεση συνέπεια αυτής της πιθανής λύσης μπορεί να έχουμε τη διάσωση του κοσμολογικού μοντέλου της επιταχυνόμενης διαστολής, αλλά θυσιάζουμε τη συμμετρία ύλης-αντιύλης, καθώς ο απωστικός χωρόχρονος κυριαρχείται από ύλη (Villata, 2013; Villata, 2024).

Στη δεύτερη λύση, την οποία προτείνει ο ερευνητής, έχουμε μία πιο ριζοσπαστική προσέγγιση. Στην περίπτωση αυτή διατηρείται η συμμετρία ύλης-αντιύλης του αρχικού συμπαντικού «πλέγματος» (lattice universe).

Ο μηχανισμός αυτού του εναλλακτικού μοντέλου βασίζεται στην κυριαρχία της αντιύλης στον αντίστροφο χωροχρόνο. Ωστόσο, όταν μικρές ποσότητες αντιύλης εισέρχονται ή δημιουργούνται στον δικό μας κυρίαρχο χωρόχρονο, αναγκάζονται να «συμβιβαστούν» σε αυτόν.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων του ALPHA-g πειράματος είναι απλή. Η αντιύλη στο ALPHA-g, προκειμένου να υπάρξει έστω και

για λίγο στο δικό μας περιβάλλον, υποχρεώνεται να ακολουθήσει το δικό μας βέλος του χρόνου. Αυτή η «απώλεια» της ιδιότητας PT (λόγω της συντριπτικής κυριαρχίας της ύλης γύρω της) εξαλείφει την απωστική δύναμη, κάνοντας το αντιυδρογόνο να συμπεριφέρεται βαρυτικά όπως την κοινή ύλη.

Όμως η κοσμολογική σημασία της άπωσης ύλης αντιύλης παραμένει ενεργή. Στις μεγάλες κοσμολογικές δομές [όπως το Τοπικό Κενό (Local Void)], στο οποίο η αντιύλη είναι απομονωμένη ίσως μπορεί να διατηρήσει τον δικό της αντίστροφο χωρόχρονο. Ο ερευνητής αναρωτιέται αν οι μελλοντικές μετρήσεις επιβεβαιώσουν την μικρότερη τιμή του g για την αντιύλη, μήπως αυτή τελικά οφείλεται σε μία μερική παρουσία του αντίστροφου χωροχρόνου –της δεύτερης λύσης– η οποία δεν έχει εξαλειφθεί τελείως στο δικό μας σύμπαν. Μένει να το δούμε.

Στη συνέχεια, ο Villata εξετάζει αν η αντιστροφή του χρόνου (T), η οποία είναι δύσκολα αποδεκτή από πολλούς φυσικούς, είναι απολύτως απαραίτητη για την άπωση των δύο Συμπάντων. Αναλύοντας τη γεωδαισιακή εξίσωση σε προσέγγιση χαμηλών ταχυτήτων και στατικού πεδίου (Νευτώνεια προσέγγιση), βρίσκει:

$$\frac{d^2 x^a}{d\tau^2} \approx -\Gamma_{00}^a \frac{dx^0}{d\tau} \frac{dx^0}{d\tau} = \frac{1}{2} g^{a\beta} \frac{\partial g_{00}}{\partial x^\beta} \left(\frac{dt}{d\tau} \right)^2 \quad (4.8)$$

Αν προσθέσουμε την επιπλέον παραδοχή ότι το πεδίο είναι ασθενές, μπορούμε εύκολα να βρούμε τη διανυσματική μορφή του νόμου του Νεύτωνα $d^2 \vec{x}/dt^2 = -\nabla \Phi$ η οποία δεν επηρεάζεται από τον τελεστή T αντιστροφής χρόνου, ενώ η P ομοτιμία του πεδίου εντοπίζεται στη βαθμίδα (gradient) και του σωματιδίου στην επιτάχυνση. Έτσι, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι, τουλάχιστον στη νευτώνεια προσέγγιση, η εξίσωση κίνησης διατηρεί τις ίδιες ελκτικές/απωστικές ιδιότητες με την αρχική γεωδαισιακή εξίσωση, αλλά τώρα η απωστική βαρύτητα θα μπορούσε να δρα μεταξύ δύο αντίθετων χώρων, χωρίς την ανάγκη αντιστροφής του χρόνου.

Ως αποτέλεσμα αυτών, μπορούμε να τοποθετήσουμε δίπλα στις δύο λύσεις που περιεγράφηκαν (PT και CPT βαρύτητα), δύο άλλες λύσεις οι οποίες δεν απαιτούν αντιστροφή χρόνου, ανοίγοντας έτσι την πιθανότητα η κοσμική άπωση να οφείλεται σε «νησίδες» αντίθετων χώρων (με ή χωρίς αντιύλη) με το ίδιο βέλος κατεύθυνσης χρόνου. Σε οποιαδήποτε από τις παραπάνω περιπτώσεις η γεωδαιτική

αλληλεπίδρασης των δύο συμπάντων περιγράφεται από την εξίσωση (4.5) ενώ η γεωδαιτική του δικού μας σύμπαντος από την (4.4)¹².

Ως εκ τούτου, ο Villata καταλήγει ότι τα αποτελέσματα του ALPHA-g (έλξη $0.75g \pm$ σφάλματα) δεν αναιρούν απαραίτητα την απωστική βαρύτητα σε κοσμολογική κλίμακα. Είτε η αντιύλη δεν είναι ο φορέας της άπωσης (Λύση 1), είτε η αντιύλη στο εργαστήριο χάνει την απωστική της φύση λόγω περιβάλλοντος (Λύση 2). Η θεωρία της απωστικής βαρύτητας παραμένει ισχυρή ως εναλλακτική της σκοτεινής ενέργειας, εξηγώντας την επιτάχυνση του σύμπαντος μέσω υπαρχουσών φυσικών οντοτήτων χωρίς την ανάγκη ad-hoc συστατικών.

¹² Εκτός αν θεωρήσουμε ότι υφίσταται ακόμα η απωστική δύναμη ύλης-αντιύλης και στο δικό μας σύμπαν ως μερικό κατάλοιπο της Μεγάλης Έκρηξης, σύμφωνα με τα προαναφερθέντα. Σε αυτή την περίπτωση ισχύει η (4.5).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερεύνησε έναν από τους πιο θεμελιώδεις και ταυτόχρονα αινιγματικούς πυλώνες της σύγχρονης φυσικής: τη συμμετρία CPT και τον ρόλο της στην κατανόηση της δομής του Σύμπαντος. Ξεκινώντας από το Καθιερωμένο Πρότυπο της σωματιδιακής φυσικής και τις κοσμολογικές εξισώσεις της Γενικής Σχετικότητας, η μελέτη ανέδειξε πώς η έννοια της συμμετρίας λειτουργεί ως ο οργανωτικός σκελετός των φυσικών νόμων. Μέσα από το θεώρημα της Noether, καταδείχθηκε ότι κάθε συνεχής συμμετρία συνεπάγεται έναν νόμο διατήρησης, μια διαπίστωση που αποτελεί τη βάση για τη σταθερότητα και την προβλεψιμότητα του φυσικού κόσμου.

Κεντρικό σημείο της ανάλυσής μας υπήρξε το Θεώρημα CPT, το οποίο επιβάλλει τη συνδυασμένη συμμετρία της συζυγίας φορτίου (C), της ομοτιμίας (P) και της αντιστροφής του χρόνου (T) σε κάθε τοπική κβαντική θεωρία πεδίου. Η εργασία εξέτασε λεπτομερώς πώς μεμονωμένες παραβιάσεις αυτών των συμμετριών —όπως η παραβίαση της P στην ασθενή αλληλεπίδραση και η παραβίαση της CP στα καόνια— οδήγησαν σε μια βαθύτερη κατανόηση της ασυμμετρίας ύλης-αντιύλης.

Μία από τις πιο ρηξικέλευθες προτάσεις που αναλύθηκαν είναι το μοντέλο του CPT-Συμμετρικού Σύμπαντος των Boyle, Finn και Turok. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, η Μεγάλη Έκρηξη δεν αποτελεί μια τυχαία ανωμαλία που παραβιάζει αυθόρμητα τη συμμετρία, αλλά ένα σημείο ανάκλασης. Το σύμπαν μας θεωρείται το ένα σκέλος ενός ζεύγους συμπάντων, όπου το «είδωλό» του εξελίσσεται αντίστροφα στον χρόνο και κυριαρχείται από αντιύλη, διατηρώντας έτσι τη συνολική συμμετρία CPT του κενού.

Το μοντέλο αυτό προσφέρει μια εξαιρετικά «οικονομική» λύση σε χρονίζοντα κοσμολογικά προβλήματα. Ακολουθεί η αριθμητική τους παράθεση:

1. **Σκοτεινή Ύλη:** Προτείνει την ύπαρξη ενός σταθερού, δεξιόστροφου «στείρου» νετρίνου (Majorana) με συγκεκριμένη μάζα ($4.8 \cdot 10^8 \text{ GeV}$), το οποίο παράγεται αυτόματα από τη γεωμετρική ασυνέχεια του Big Bang.

2. **Βαρυονική Ασυμμετρία:** Εξηγεί την επικράτηση της ύλης στο δικό μας σύμπαν χωρίς την ανάγκη για τον κοσμικό πληθωρισμό, καθώς η συνολική ποσότητα ύλης-αντιύλης στο διπλό σύμπαν παραμένει μηδενική.
3. **Προβλέψεις:** Το μοντέλο οδηγεί σε συγκεκριμένες πειραματικές προβλέψεις, όπως ότι το ελαφρύτερο νεutrino πρέπει να είναι άμαζο ($m_{\text{light}}=0$) και ότι δεν υφίστανται αρχέγονα βαρυτικά κύματα.

Η έρευνα δεν περιορίστηκε σε θεωρητικό επίπεδο, αλλά εξέτασε κρίσιμα πειραματικά δεδομένα. Τα ασυνήθιστα «ανοδικά» σήματα της αποστολής ANITA στην Ανταρκτική συζητήθηκαν ως πιθανές ενδείξεις διάσπασης βαρέων δεξιόστροφων νεutrino στο εσωτερικό της Γης, προσφέροντας μια γέφυρα μεταξύ θεωρίας και παρατήρησης. Ταυτόχρονα, αναλύθηκαν τα αποτελέσματα του πειράματος ALPHA-g στο CERN. Αν και οι πρώτες μετρήσεις έδειξαν ότι η αντιύλη υπόκειται σε ελκτική βαρύτητα ($0.75g \pm \text{σφάλμα}$), γεγονός που φαινομενικά αμφισβητεί τις θεωρίες περί βαρυτικής άπωσης μεταξύ ύλης και αντιύλης, η συζήτηση παραμένει ανοιχτή. Η εργασία παρουσίασε την αναθεωρημένη άποψη του Villata (2024), ο οποίος υποστηρίζει ότι η πλήρης εικόνα της CPT συμμετρίας στον χωρόχρονο ίσως απαιτεί την εξέταση της άπωσης σε κοσμολογικές κλίμακες μεταξύ των δύο Συμπάντων ή σε περιβάλλοντα μακριά από μεγάλες μάζες ύλης στο δικό μας Σύμπαν.

Συμπερασματικά, η συμμετρία CPT αναδεικνύεται σε κάτι πολύ περισσότερο από έναν μαθηματικό κανόνα της κβαντικής θεωρίας πεδίου· αποτελεί το «κλειδί» για μια νέα ανάγνωση της κοσμικής ιστορίας. Η υιοθέτηση ενός CPT-συμμετρικού πλαισίου επιτρέπει την ερμηνεία της σκοτεινής ύλης και της επιταχυνόμενης διαστολής χωρίς την εισαγωγή εξωτικών πεδίων ή της σκοτεινής ενέργειας, επαναφέροντας την καθιερωμένη φυσική σε μια τροχιά ενότητας και απλότητας.

Παρά τις προκλήσεις από πειράματα όπως το ALPHA-g, η δυναμική της CPT συμμετρίας παραμένει ισχυρή. Η μελλοντική έρευνα, ιδιαίτερα στον τομέα των ταλαντώσεων των νεutrino και της αναζήτησης της διπλής βήτα διάσπασης χωρίς νεutrino, θα είναι καθοριστική για την επικύρωση ή την αναθεώρηση αυτών των μοντέλων. Το Σύμπαν, αν και κατά 95% άγνωστο, φαίνεται να «ψιθυρίζει» τα μυστικά του μέσα από τις συμμετρίες του, υπενθυμίζοντάς μας ότι η ομορφιά της φυσικής

κρύβεται στην ισορροπία και στις συμμετρίες μεταξύ του ορατού και του αόρατου κόσμου.

«Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.»

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Amendola, L., & Tsujikawa, S. (2010). *Dark energy: Theory and observations*. Cambridge University Press.

Anchordoqui, L. A., & Antoniadis, I. (2019). Supersymmetric sphaleron configurations as the origin of the perplexing ANITA events. *Physics Letters B*, 790, 578-582. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.02.003>

Anchordoqui, L. A., Barger, V., Learned, J. G., Marfatia, D., & Weiler, T. J. (2018). Upgoing ANITA events as evidence of the CPT symmetric universe. *Letters in High Energy Physics*, 1(1), 13. <https://doi.org/10.31526/LHEP.1.2018.03>

Anderson, E. K., et al. (ALPHA Collaboration). (2023). Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter. *Nature*, 621(7980), 716-722. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06527-1>

Angelopoulos, A., et al. (CPLEAR Collaboration). (1998). First direct observation of time-reversal non-invariance in the neutral-kaon system. *Physics Letters B*, 444(1-2), 43-51.

Αντωνίου, Α. (2025). *Γενική Σχετικότητα και Κοσμολογία*. Εκδόσεις Ζήτη.

Bertone, G., & Hooper, D. (2018). History of dark matter. *Reviews of Modern Physics*, 90(4), Article 045002. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.90.045002>

Binney, J., & Tremaine, S. (2008). *Galactic Dynamics* (2nd ed.). Princeton University Press.

Boyle, L., Finn, K., & Turok, N. (2018). CPT-Symmetric Universe. *Physical Review Letters*, 121(25), 251301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.251301>

Boyle, L., Finn, K., & Turok, N. (2022). The Big Bang, CPT, and neutrino dark matter. *Annals of Physics*, 438(7). <https://doi.org/10.1016/j.aop.2022.168767>

Boyle, L., Finn, K., & Turok, N. (2024). Thermodynamic solution of the homogeneity, isotropy and flatness puzzles (and a clue to the cosmological constant). *Physics Letters B*, 849(25), 138442. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.138442>

Carroll, S. M. (2004). *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. Addison Wesley.

CERN. (2023). *ALPHA experiment at CERN observes the influence of gravity on antimatter*. <https://home.cern/news/news/physics/alpha-experiment-cern-observes-influence-gravity-antimatter>

Christenson, J. H., Cronin, J. W., Fitch, V. L., & Turlay, R. (1964). Evidence for the 2π decay of the K_2^0 meson. *Physical Review Letters*, 13(4), 138–140. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.138>

Einstein, A. (1916). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 354(7), 769-822.

Fiscaletti, D., Licata, I., & Tamburini, F. (2021). CPT Symmetry in Two-Fold de Sitter Universe. *Symmetry*, 13(10), 1836. <https://doi.org/10.3390/sym13030375>

Greene, B. (2024). *Η Δομή του Κόσμου* (μτφ. Μ. Φλωράκη). Εκδόσεις Ροπή.

Griffiths, D. (2008). *Introduction to Elementary Particles* (2nd revised ed.). Wiley-VCH.

KATRIN Collaboration. (2022). Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity. *Nature Physics*, 18(2) (160-166). <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01463-1>

Kolb, E. W., & Turner, M. S. (1990). *The early universe*. Westview Press.

Lee, T. D., & Yang, C. N. (1956). Question of parity conservation in weak interactions. *Physical Review*, 104(1), 254–258. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.104.254>

Liddle, A. (2015). *An Introduction to Modern Cosmology* (3rd ed.). Wiley

Lüders, G. (1957). On the equivalence of invariance under time reversal and under particle-antiparticle conjugation for relativistic field theories. *Annals of Physics*, 2(1), 1–17. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(57\)90032-5](https://doi.org/10.1016/0003-4916(57)90032-5)

Mack, K. (2020). *Το Τέλος των Πάντων* (Α. Μιχαλίδης, Μεταφ.). Εκδόσεις Μεταίχμιο.

Martin, B. R., & Shaw, G. (2017). *Particle Physics* (4th ed.). John Wiley & Sons.

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>

Noether, E. (1918). Invariante Variationsprobleme. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 235–257.

Peebles, P. J. E. (1993). *Principles of Physical Cosmology*. Princeton University Press.

Perkins, D. H. (2000). *Introduction to High Energy Physics* (4th ed.). Cambridge University Press.

Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., Knop, R. A., Nugent, P., Castro, P. G., Deustua, S. E., Fabbro, S., Goobar, A., Groom, D. E., Hook, I. M., Kim, A. G., Kim, M. Y., Lee, J. C., Nunes, N. J., Pain, R., Pennypacker, C. R., Quimby, R., Lidman, C., ... Panagia, N. (1999). Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae. *The Astrophysical Journal*, 517(2), 565–586.

Planck Collaboration. (2020). Planck 2018 results: VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, Article A6. <https://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201833910e>

Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., Clocchiatti, A., Diercks, A., Garnavich, P. M., Gilliland, R. L., Hogan, C. J., Jha, S., Kirshner, R. P., Leibundgut, B., Phillips, M. M., Reiss, D., Schmidt, B. P., Schommer, R. A., Smith, R. C., Spyromilio, J., Stubbs, C., Suntzeff, N. B., & Tonry, J. (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>

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.

<https://doi.org/10.1086/150317>

Rubin, V. C., Ford, W. K., Jr., & Thonnard, N. (1980). Rotational properties of 21 SC galaxies with well-determined rotation curves. *The Astrophysical Journal*, 238, 471–487.

Ryden, B. (2017). *Introduction to Cosmology* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Sakharov, A. D. (1967). Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. *JETP Letters*, 5, 24-27.

Sakurai, J. J., & Napolitano, J. (2017). *Modern Quantum Mechanics* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Streater, R. F., & Wightman, A. S. (1964). *PCT, Spin and Statistics, and All That*. W. A. Benjamin.

Turok, N., & Boyle, L. (2023). A Minimal Explanation of the Primordial Cosmological Perturbations. *arXiv preprint arXiv:2302.00344v1*.

Tyson, N. (2024). *Η Αρχή* (Χ. Λιθαρής, Μεταφ.). Εκδόσεις Διόπτρα.

Villata, M. (2011). CPT symmetry and antimatter gravity in general relativity. *EPL (Europhysics Letters)*, 94(2), 20001.

Villata, M. (2013). On the nature of dark energy: the lattice Universe. *Astrophysics and Space Science*, 345, 1.

Villata, M. (2024). Antimatter Gravity and the Results of the ALPHA-g Experiment. *Annalen der Physik*, 536(1), 2300519. <https://doi.org/10.1002/andp.202300519>

Wheeler, J. A. (1990). *A Journey Into Gravity and Spacetime*. Scientific American Library.

Wu, C. S., Ambler, E., Hayward, R. W., Hoppes, D. D., & Hudson, R. P. (1957). Experimental test of parity conservation in beta decay. *Physical Review*, 105(4), 1413–1415. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.105.1413>

Zwicky, F. (1937). On the masses of nebulae and clusters of nebulae. *The Astrophysical Journal*, 86, 217–246. <https://doi.org/10.1086/143864>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ο ΣΥΜΜΟΡΦΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΚΟΣΜΟΛΟΓΙΑ

Ο σύμμορφος χρόνος (conformal time), τον οποίο συνήθως συμβολίζουμε με το ελληνικό γράμμα τ , είναι μια εξαιρετικά χρήσιμη μαθηματική αναπαράσταση του χρόνου στην κοσμολογία. Σε αντίθεση με τον κοσμικό χρόνο (t) —τον χρόνο που θα μετρούσε ένα ρολόι που «κάθεται» ακίνητο στο διαστελλόμενο σύμπαν— ο σύμμορφος χρόνος ορίζεται έτσι ώστε να «ακολουθεί» τη διαστολή, κάνοντας τη γεωμετρία του χωροχρόνου να μοιάζει πολύ περισσότερο με την απλή, επίπεδη γεωμετρία του Minkowski που μαθαίνουμε στην Ειδική Σχετικότητα. Ο σύμμορφος χρόνος τ ορίζεται μέσω του διαφορικού του ως εξής:

$$d\tau = \frac{dt}{a(t)} \quad (\text{Π.1})$$

όπου, t είναι ο κοσμικός χρόνος και $a(t)$ είναι ο παράγοντας κλίμακας (scale factor), που περιγράφει πόσο έχει διασταλεί το σύμπαν. Για να βρούμε τον συνολικό σύμμορφο χρόνο από τη στιγμή της Μεγάλης Έκρηξης ($t=0$) μέχρι μια στιγμή t , ολοκληρώνουμε:

$$\tau(t) = \int_0^t \frac{dt'}{a(t')} \quad (\text{Π.2})$$

Η ονομασία προέρχεται από το γεγονός ότι η μετρική του χωροχρόνου (Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker - FLRW) παίρνει μια «σύμμορφη» μορφή. Δηλαδή, αν θεωρήσουμε ένα επίπεδο σύμπαν ($k=0$), το στοιχείο μήκους ds^2 στον κοσμικό χρόνο είναι:

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 (dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (\text{Π.3})$$

Αντικαθιστώντας το dt με $a(\tau)d\tau$, η εξίσωση γίνεται:

$$ds^2 = a(\tau)^2 (-d\tau^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (\Pi.4)$$

Σε αυτή τη μορφή, ολόκληρη η μετρική είναι απλώς η μετρική του Minkowski πολλαπλασιασμένη με έναν παράγοντα κλίμακας $a(\tau)^2$. Αυτό σημαίνει ότι οι κώνοι φωτός στον σύμμορφο χρόνο είναι πάντα στις 45° μοίρες, ακριβώς όπως στην ειδική σχετικότητα. Η φυσική σημασία της χρήσης του τ διευκολύνει τους κοσμολόγους για τους εξής λόγους:

- 1. Διάδοση του φωτός:** Το φως διανύει μια «συν-κινούμενη» ή αδρανειακή απόσταση (comoving distance) ίση με τη μεταβολή του σύμμορφου χρόνου ($dx=d\tau$).
- 2. Ορίζοντας Σωματιδίων:** Ο σύμμορφος χρόνος από τη στιγμή μηδέν έως σήμερα ορίζει το μέγιστο μέγεθος του ορατού μας σύμπαντος.

Η Θεωρία των Boyle, Finn και Turok (CPT-Symmetric Universe) χρησιμοποιεί τον σύμμορφο χρόνο για να επεκτείνει το σύμπαν «πριν» από τη Μεγάλη Έκρηξη. Υποθέτουν ότι ο παράγοντας κλίμακας είναι μια αναλυτική συνάρτηση του τ . Στο μοντέλο τους, το σύμπαν πριν το Big Bang είναι το «είδωλο» του δικού μας, όπου ο χρόνος και ο χώρος αναστρέφονται (CPT συμμετρία).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΥΠΟΘΕΣΗ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ WEYL

Η Υπόθεση Καμπυλότητας Weyl (Weyl Curvature Hypothesis - WCH) προτάθηκε από τον μαθηματικό και φυσικό Sir Roger Penrose το 1979. Αποτελεί μια προσπάθεια σύνδεσης της Γενικής Σχετικότητας με τον Δεύτερο Θερμοδυναμικό Νόμο, εξηγώντας γιατί το σύμπαν ξεκίνησε σε κατάσταση εξαιρετικά χαμηλής εντροπίας.

Στη Γενική Σχετικότητα, η καμπυλότητα του χωροχρόνου περιγράφεται από τον τανυστή Riemann R_{abcd} , ο οποίος αναλύεται σε δύο μέρη, τον τανυστή Ricci R_{ab} και τον τανυστή Weyl C_{abcd} . Ο πρώτος συνδέεται άμεσα με την παρουσία ύλης και ενέργειας μέσω των εξισώσεων Einstein ενώ ο δεύτερος αντιπροσωπεύει το «ελεύθερο» βαρυτικό πεδίο (παλιρροϊκές δυνάμεις, βαρυτικά κύματα κ.α.) Ο τανυστής καμπυλότητας Riemann R_{abcd} σε $n=4$ διαστάσεις αναλύεται ως εξής:

$$R_{abcd} = C_{abcd} + \frac{1}{2}(g_{ac}R_{bd} - g_{ad}R_{bc} + g_{bd}R_{ac} - g_{bc}R_{ad}) - \frac{R(g_{ac}g_{bd} - g_{ad}g_{bc})}{6} \quad (\text{Π.5})$$

όπου ο C_{abcd} ο τανυστής Weyl, g_{ij} ο μετρικός τανυστής, R_{ij} ο τανυστής Ricci και R η βαθμωτή καμπυλότητα (Ricci scalar).

Η υπόθεση του Penrose δηλώνει ότι στην αρχική ανωμαλία (Big Bang), η καμπυλότητα Weyl ήταν μηδενική ή εξαιρετικά μικρή, ενώ στις τελικές ανωμαλίες (μαύρες τρύπες) τείνει στο άπειρο. Η μαθηματική απαίτηση της WCH είναι:

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} C_{abcd} = 0 \quad (\text{Π.6})$$

Αυτό σημαίνει ότι το πρώιμο σύμπαν ήταν ισότροπο και ομογενές (όπως περιγράφεται από τη μετρική Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker), όπου η ύλη είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη και δεν υπάρχουν προϋπάρχουσες μαύρες τρύπες ή έντονα βαρυτικά κύματα. Ποια η σύνδεση αυτής της παρατήρησης με την εντροπία;

Η εντροπία ενός συστήματος με βαρύτητα συμπεριφέρεται αντίθετα από αυτή που γνωρίζουμε για ένα αέριο σε ένα κουτί. Στο αέριο η μέγιστη εντροπία επιτυγχάνεται με την ομοιομορφία ενώ στη βαρύτητα η χαμηλή εντροπία είναι η ομοιομορφία. Η υψηλή εντροπία επιτυγχάνεται με τη συσσώρευση ύλης (σχηματισμός άστρων, γαλαξιών και τελικά μαύρων τρυπών).

Εφόσον η εντροπία των μαύρων τρυπών σύμφωνα με την εξίσωση, Bekenstein-Hawking είναι τεράστια ($S_{BH} \propto$ επιφάνειας του ορίζοντα γεγονότων), και ο τανυστής Weyl «κυριαρχεί» κοντά σε αυτές, ο Penrose πρότεινε ότι ο C_{abcd} είναι ένα μέτρο της βαρυτικής εντροπίας. Σύμφωνα με αυτή τη μαθηματική λογική, η υπόθεση Weyl παρέχει μια γεωμετρική εξήγηση για το Βέλος του Χρόνου. Αν ο τανυστής Weyl δεν ήταν μηδέν στην αρχή, το σύμπαν θα είχε ξεκινήσει «ανακατεμένο» και χαοτικό, και η ζωή (που απαιτεί διαβαθμίσεις ενέργειας) δεν θα μπορούσε να υπάρξει.

Στο CPT-Symmetric Universe η υπόθεση Weyl ικανοποιείται με έναν εντελώς νέο τρόπο. Το σύμπαν πριν το Bang είναι η «κατοπτρική εικόνα» του δικού μας, όπως είδαμε και αναλύσαμε. Η κατάσταση $C_{abcd}=0$ στο $t=0$ επιβάλλεται από τη συμμετρία CPT. Αυτή είναι μια πολύ πιο κομψή λύση, καθώς ο μηδενισμός του Weyl δεν είναι πλέον μια αυθαίρετη παραδοχή (όπως στον Penrose), αλλά αποτέλεσμα μιας θεμελιώδους συμμετρίας της φύσης, της CPT συμμετρίας.

Στην κλασική Γενική Σχετικότητα, η «ανωμαλία» (singularity) στο $t=0$ επιτρέπει άπειρες δυνατές καταστάσεις. Στο μοντέλο CPT, η απαίτηση η συνολική δράση (action) να είναι πεπερασμένη και το σύμπαν να είναι συμμετρικό, αναγκάζει τη γεωμετρία να είναι «συμμορφικά επίπεδη» (conformally flat) στο σημείο μηδέν. Μαθηματικά, αυτό μεταφράζεται στην εξαφάνιση του τανυστή Weyl, δηλαδή $C_{abcd}(\tau)=0$, για $\tau=0$, όπου τ ο σύμμορφος χρόνος¹³. Η συνθήκη $C_{abcd}=0$ επιβάλλεται από τη συμμετρία CPT, καθώς ο τανυστής Weyl πρέπει να παραμείνει αναλλοίωτος κάτω από αυτό τον μετασχηματισμό, κάτι που στο σημείο της «ανωμαλίας» οδηγεί στον μηδενισμό του για να αποφευχθεί η μαθηματική ασυνέχεια.

Η ανάλυση του Turok και των συνεργατών του δείχνει ότι οι διαταραχές του τανυστή Ricci (ύλη) επιτρέπονται αλλά οι διαταραχές του τανυστή Weyl (βαρυτικά κύματα/ανισοτροπίες) τείνουν στο μηδέν καθώς $\tau \rightarrow 0$. Ο Penrose υπέθεσε τον

¹³ Τον οποίο είδαμε στο κύριο σώμα της μελέτης και τον αναλύσαμε στο Παράρτημα Α.

$C_{abcd}=0$ για να εξηγήσει το Βέλος του Χρόνου. Ο Turok λέει: «Δεν χρειάζεται να τον υποθέσουμε. Αν το σύμπαν είναι ένα κατοπτρικό είδωλο που υπακούει στη συμμετρία CPT, τότε η κατάσταση $Weyl=0$ στο Bang είναι η μόνη μαθηματικά επιτρεπτή λύση που δεν καταστρέφει τη συμμετρία». Σε αυτή την περίπτωση το «βέλος του χρόνου» προκύπτει αυθόρμητα επειδή η εντροπία αυξάνεται και προς τις δύο κατευθύνσεις απομακρυνόμενη από το $\tau=0$.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ SEESAW (ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ «ΤΡΑΜΠΑΛΑΣ»)

Ο μηχανισμός Seesaw (τραμπάλας ή εκκρεμούς) είναι μια από τις πιο κομψές θεωρίες στη σωματιδιακή φυσική. Χρησιμοποιείται για να εξηγήσει γιατί τα νετρίνα έχουν τόσο απειροελάχιστη μάζα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα στοιχειώδη σωματίδια (όπως τα ηλεκτρόνια ή τα quarks). Η βασική ιδέα είναι απλή: η μικρή μάζα των γνωστών νετρίνων οφείλεται στην ύπαρξη πολύ βαριών, υποθετικών νετρίνων. Όσο πιο βαρύ είναι το ένα, τόσο πιο ελαφρύ γίνεται το άλλο—εξ ου και το όνομα «seesaw».

Στο Καθιερωμένο Πρότυπο, τα σωματίδια αποκτούν μάζα μέσω του μηχανισμού Higgs (μάζα Dirac). Ωστόσο, επειδή τα νετρίνα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα, μπορούν θεωρητικά να είναι τα ίδια τα αντισωματίδια τους (σωματίδια Majorana). Αν θεωρήσουμε ένα αριστερόστροφο νετρίνο ν_L και ένα πολύ βαρύ δεξιόστροφο νετρίνο N_R , δημιουργούμε ένα πίνακα μάζας στη βάση $(\nu_L, N_R^c)^{14}$. Ο μηχανισμός Seesaw συνδυάζει αυτούς τους δύο τύπους μάζας στον πίνακα μάζας M , τον οποίο παρουσιάζουμε στην παρακάτω εξίσωση:

$$M = \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & M_R \end{pmatrix} \quad (\text{Π.7})$$

όπου m_D η μάζα Dirac (ανάλογη με τις μάζες των άλλων σωματιδίων, π.χ. μερικά GeV) και M_R η μάζα Majorana του δεξιόστροφου νετρίνου (πολύ μεγάλης κλίμακας, π.χ. 10^{14}GeV).

Για να βρούμε τις φυσικές μάζες των σωματιδίων, πρέπει να διαγωνιοποιήσουμε τον πίνακα M , μέσω της εξίσωσης $\det(M - \lambda I) = 0$. Η βάση, με την οποία δουλεύουμε, αποτελείται από δύο πεδία που συμπεριφέρονται ως αριστερόστροφα Weyl spinors. Το ν_L είναι το κλασικό, «ελαφρύ» αριστερόστροφο νετρίνο του Καθιερωμένου Προτύπου και το N_R^c το οποίο είναι το νετρίνο συζυγούς φορτίου (charge conjugate) του δεξιόστροφου νετρίνου N_R . Επιλύοντας την χαρακτηριστική εξίσωση για την περίπτωση όπου $M_R \gg m_D$, προκύπτουν δύο ιδιοτιμές (μάζες): το βαρύ νετρίνο

¹⁴ Ο εκθέτης c συμβολίζει τη συζυγία φορτίου (charge conjugation). Ουσιαστικά το N_R^c είναι ένα αριστερόστροφο πεδίο που προκύπτει από το δεξιόστροφο N_R .

$m_{\text{heavy}} \approx M_R$. Αυτό παραμένει εξαιρετικά βαρύ, κοντά στην κλίμακα της Μεγάλης Ενοποίησης (GUT) και το ελαφρύ νεutrino (αυτό που παρατηρούμε), $m_{\text{light}} \approx m_D^2/M_R$.

Η φυσική ερμηνεία για το παραπάνω αποτέλεσμα βρίσκεται στον παρονομαστή, δηλαδή, όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του βαρέως νεutrino, τόσο μικρότερη γίνεται η μάζα του ελαφρύ νεutrino. Γιατί είναι σημαντικά αυτά τα αποτελέσματα;

Καταρχάς παρέχουν μία πρώτη εξήγηση της Ιεραρχίας. Δίνουν μια φυσική απάντηση στο γιατί το νεutrino είναι τουλάχιστον ένα εκατομμύριο φορές ελαφρύτερο από το ηλεκτρόνιο. Στον τομέα της κοσμολογίας μπορούν να συνεισφέρουν στην απάντηση της ασυμμετρίας ύλης αντιύλης. Η διάσπαση αυτών των βαρέων νεutrino στο πρώιμο σύμπαν μπορεί να εξηγήσει την ασυμμετρία αυτή μέσω της λεπτογένεσης (leptogenesis). Τέλος, παρέχει ενδείξεις για νέα Φυσική. Η «εμφάνιση» αυτών των νέων σωματιδίων (αν παρατηρηθούν πειραματικά) αποτελεί μια ισχυρή ένδειξη για φυσική πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο.

Ίσως η πιο συναρπαστική συνέπεια του seesaw είναι η λεπτογένεση. Τα βαριά νεutrino N_R στο πρώιμο σύμπαν διασπώνται. Λόγω της παραβίασης της συμμετρίας CP, διασπώνται σε περισσότερα λεπτόνια από ό,τι αντιλεπτόνια. Αυτή η πλεονάζουσα ποσότητα λεπτονίων μετατρέπεται στη συνέχεια σε πλεόνασμα βαρυονίων (ύλης). Μέσω πολύπλοκων κβαντικών διαδικασιών του Καθιερωμένου Προτύπου (που ονομάζονται sphalerons¹⁵), αυτή η «λεπτονική ασυμμετρία» μετατρέπεται σε «βαρυονική ασυμμετρία» (πλεόνασμα πρωτονίων/νετρονίων έναντι αντιπρωτονίων). Σύμφωνα με τα παραπάνω, χωρίς τον μηχανισμό Seesaw, ίσως να μην υπήρχε αρκετή ύλη στο σύμπαν για να σχηματιστούν γαλαξίες και ζωή.

Αν ο μηχανισμός Seesaw ισχύει, περιμένουμε να δούμε διαδικασίες που παραβιάζουν τον λεπτονικό αριθμό. Η πιο σημαντική αναζήτηση είναι η διπλή β-διάσπαση χωρίς νεutrino (0νββ)¹⁶: Αν παρατηρηθεί αυτό το φαινόμενο σε πυρήνες όπως το Γερμάνιο ή το Ξένο, θα αποδειχθεί ότι το νεutrino είναι σωματίδιο Majorana (το αντισωματίδιό του είναι ο εαυτός του). Αυτή θα ήταν η οριστική επιβεβαίωση ότι ο μηχανισμός seesaw (ή κάτι παρόμοιο) είναι η αιτία της μάζας των νεutrino. Επίσης, η αναζήτηση στον LHC (CERN) και σε άλλους επιταχυντές εμφανίζει νέες προκλήσεις. Τα δεξιόστροφα νεutrino N είναι «στείρα» (sterile), δηλαδή δεν αισθάνονται τις

¹⁵ Για τον σφαλερονικό μηχανισμό συζητάμε στο Παράρτημα Δ.

¹⁶ Την αναφέραμε στο κύριο σώμα της μελέτης.

Γιώργος Κουνδουράκης, «Η Συμμετρία CPT στη Σωματιδιακή Φυσική και στην Κοσμολογία»

ασθενείς δυνάμεις. Αν η μάζα τους είναι στην κλίμακα GUT (10^{14}GeV), είναι αδύνατο να παραχθούν στον LHC. Όμως, αν η μάζα M_R είναι μικρότερη (π.χ. στην κλίμακα των TeV), τότε θα μπορούσαμε να τα δούμε.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΦΑΛΕΡΟΝΙΩΝ (SPHALERON MECHANISM)

Η θεωρία των σφαλερονίων (sphalerons) είναι ένα από τα πιο συναρπαστικά και «εξωτικά» κεφάλαια της σωματιδιακής φυσικής και της κοσμολογίας. Ίσως παρέχει μία ικανοποιητική εξήγηση του γιατί υπάρχουμε, δηλαδή γιατί το σύμπαν αποτελείται από ύλη και όχι από ένα άδειο «πέλαγος ακτινοβολίας». Τα σφαλερόνια παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην απάντηση, μαζί με το μηχανισμό seesaw, τον οποίο είδαμε στο προηγούμενο Παράρτημα Γ. Όλα αυτά αναζητούν πειραματική επαλήθευση ή διάψευση. Θα αναλύσουμε με απλά λόγια και στη συνέχεια θα παραθέσουμε μία φορμαλιστικότερη εξήγηση.

Στο Καθιερωμένο Πρότυπο, το «κενό» δεν είναι απλώς άδειος χώρος, αλλά έχει μια πολύπλοκη δομή με πολλά «πηγάδια» ενέργειας. Το τοπολογικό «μονοπάτι» θα μπορούσαμε να το φανταστούμε ως μια σειρά από κοιλάδες οι οποίες χωρίζονται από λόφους. Κάθε κοιλάδα αντιπροσωπεύει μια διαφορετική κατάσταση του κενού. Η «γέφυρα» η οποία ανοίγει το «δίαυλο» επικοινωνίας είναι το σφαλερόνιο. Το σφαλερόνιο δεν είναι ένα σωματίδιο που μπορείς να βάλεις σε ένα κουτί, αλλά μια ασταθής διαμόρφωση του πεδίου που βρίσκεται ακριβώς στην κορυφή του λόφου ανάμεσα σε δύο κοιλάδες¹⁷.

Στην κλασική φυσική, ο αριθμός των βαρυονίων (όπως πρωτόνια και νετρόνια) παραμένει σταθερός. Όμως, όταν το σύστημα «πηδάει» πάνω από το φράγμα του σφαλερονίου (από τη μία κοιλάδα στην άλλη), συμβαίνει κάτι παράξενο. Ο αριθμός των βαρυονίων (B) και ο αριθμός των λεπτονίων (L) μεταβάλλεται, αλλά παρόλο που τα B και L αλλάζουν μεμονωμένα, η διαφορά τους (B-L) παραμένει σταθερή. Τα σφαλερόνια μπορούν να δημιουργήσουν ή να καταστρέψουν ύλη, αρκεί να το κάνουν σε «συγχρονισμό» με τα λεπτόνια. Πως όλα αυτά οδηγούν στη βαρυογένεση στο πρώιμο σύμπαν;

¹⁷ Η λέξη προέρχεται από το ελληνικό "σφαλερός" (ολισθηρός, έτοιμος να πέσει), ακριβώς επειδή πρόκειται για μια κατάσταση ισορροπίας που είναι έτοιμη να «κυλήσει» προς τη μία ή την άλλη πλευρά.

Στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες του πρώιμου σύμπαντος (λίγο μετά το Big Bang), υπήρχε αρκετή θερμική ενέργεια ώστε το σύστημα να «σκαρφαλώνει» συνεχώς πάνω από αυτούς τους ενεργειακούς λόφους μέσω των σφαλερονίων. Αν στο πρώιμο σύμπαν δημιουργήθηκε μια μικρή ανισορροπία στα λεπτόνια (π.χ. από διασπάσεις βαριών νετρίνων όπως είδαμε), τα σφαλερόνια έδρασαν σαν «μετατροπείς», παίρνοντας αυτή την ανισορροπία των λεπτονίων και μετατρέποντάς την σε πλεόνασμα ύλης (βαρυονίων) έναντι αντιύλης. Χωρίς αυτή τη διαδικασία, η ύλη και η αντιύλη θα είχαν εξουδετερωθεί πλήρως, και θα προέκυπτε ένα σύμπαν καθαρής ενέργειας, χωρίς την παρουσία ύλης.

Με λίγα λόγια το σφαλερόνιο είναι ο «διακόπτης» που επιτρέπει στο σύμπαν να αλλάζει τον αριθμό των σωματιδίων ύλης που διαθέτει. Είναι μια κβαντική διαδικασία που συμβαίνει μόνο σε ακραίες ενέργειες και εξηγεί το πώς από το «τίποτα» ή καλύτερα από την απόλυτη συμμετρία, καταλήξαμε σε ένα σύμπαν γεμάτο γαλαξίες.

Για να κατανοήσουμε βαθύτερα τα σφαλερόνια, πρέπει να εισέλθουμε στον κόσμο της μη-τετριμμένης τοπολογίας της Ηλεκτρασθενούς θεωρίας και να δούμε πώς αυτή συνδέεται με τις θεμελιώδεις συμμετρίες.

Στην κβαντική θεωρία πεδίου (QFT), το κενό δεν είναι μοναδικό. Λόγω της δομής της ομάδας συμμετρίας SU(2) της ασθενούς αλληλεπίδρασης, υπάρχουν άπειρες καταστάσεις κενού που είναι ενεργειακά ισοδύναμες αλλά τοπολογικά διαφορετικές. Κάθε κατάσταση κενού χαρακτηρίζεται από έναν ακέραιο αριθμό n_{CS} (αριθμός Chern-Simons). Σε χαμηλές ενέργειες, η μετάβαση από το κενό n στο κενό $n+1$ μπορεί να γίνει μόνο μέσω κβαντικού φαινομένου σήραγγας. Αυτές οι λύσεις ονομάζονται instantons και η πιθανότητά τους είναι εξαιρετικά μικρή (πρακτικά μηδενική στο σημερινό σύμπαν). Το σφαλερόνιο είναι η «κορυφή» του φραγματος που χωρίζει αυτές τις καταστάσεις. Σε θερμοκρασίες πάνω από την κλίμακα της ηλεκτρασθενούς συμμετρίας ($T > 100$ GeV), το σύστημα δεν χρειάζεται το φαινόμενο σήραγγας· έχει αρκετή ενέργεια για να «πηδήξει» πάνω από τον ενεργειακό λόφο. Η ενέργεια αυτής της «γέφυρας» δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση (3.12) του κυρίως κειμένου την οποία θα ξαναγράψουμε σε αυτό το σημείο:

$$E_{sph} \approx \frac{2\pi M_W}{a_W} B(\kappa) \approx 9TeV \quad (\Pi.8)$$

όπου M_W είναι η μάζα του μποζονίου W και a_W η σταθερά σύζευξης της ασθενούς αλληλεπίδρασης.

Γιατί όμως η αλλαγή του n_{CS} αλλάζει την ύλη; Αυτό οφείλεται στην κβαντική ανωμαλία Adler-Bell-Jackiw (Adler-Bell-Jackiw anomaly). Η μαθηματική σχέση η οποία συνδέει τη μεταβολή του βαρυονικού (B) και λεπτονικού (L) αριθμού με την τοπολογία, είναι:

$$\Delta B = \Delta L = N_f \Delta n_{CS} \quad (\Pi.9)$$

όπου $N_f=3$ (οι τρεις γενιές σωματιδίων). Αν $\Delta n_{CS}=1$, δημιουργούνται 3 κουάρκ (ένα από κάθε γενιά) και 3 λεπτόνια. Είναι εύκολο να καταλάβουμε, από την παρπάνω σχέση, ότι $\Delta B - \Delta L = \Delta(B-L)=0$. Η διαφορά $B-L$ αποτελεί μία απόλυτη συμμετρία στο Καθιερωμένο Πρότυπο, αλλά το άθροισμα $B+L$ παραβιάζεται «ανώμαλα» από τα σφαλερόνια.

Όπως είδαμε και στην προηγούμενη ανάλυσή μας για το CPT-Συμμετρικό Σύμπαν, η παραβίαση της CP (Charge-Parity) είναι απαραίτητη για να «προτιμήσει» το σύμπαν την ύλη. Αν η φύση ήταν απόλυτα συμμετρική ως προς το CP, τα σφαλερόνια θα παρήγαγαν βαρυόνια και αντιβαρυόνια με τον ίδιο ακριβώς ρυθμό. Η παραβίαση CP, η οποία στην ασθενή αλληλεπίδραση περιγράφεται από τη φάση στον πίνακα CKM, κάνει τη μετάβαση $n \rightarrow n+1$ ελαφρώς πιο πιθανή ή διαφορετική από την $n \rightarrow n-1$. Το πρόβλημα είναι ότι η παραβίαση CP που βρίσκουμε στο Καθιερωμένο Πρότυπο είναι πολύ μικρή για να εξηγήσει την ποσότητα της ύλης που βλέπουμε. Αυτό οδηγεί τους φυσικούς σε νέες θεωρίες «Πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο», όπως η λεπτογένεση μέσω δεξιών νετρίνων Majorana¹⁸, κατά την οποία μια αρχική ασυμμετρία στα λεπτόνια «μεταγγίζεται» στα βαρυόνια μέσω των σφαλερονίων.

Συνοπτικά θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η τοπολογία του κενού παρέχει το μονοπάτι (σφαλερόνια), αλλά η παραβίαση CP παρέχει την κατεύθυνση

¹⁸ Τα συναντήσαμε στο κύριο σώμα και στο Παράρτημα Γ. Τα παρουσιάζουμε αναλυτικότερα στο Παράρτημα Ε.

Γιώργος Κουνδουράκης, «Η Συμμετρία CPT στη Σωματιδιακή Φυσική και στην Κοσμολογία»

(περισσότερη ύλη). Χωρίς αυτά τα τοπολογικά «άλματα», το σύμπαν θα ήταν ένας παγωμένος χώρος χωρίς τη δυνατότητα δημιουργίας της βαρυονικής μάζας που αποτελεί τους αστέρες και εμάς.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

NETRINA MAJORANA

Οι ιδιοκαταστάσεις Majorana (Majorana Bound States - MBS) αποτελούν ένα από τα πιο συναρπαστικά κεφάλαια της σύγχρονης φυσικής συμπυκνωμένης ύλης, καθώς συνδυάζουν τη θεμελιώδη σωματιδιακή φυσική με την κοσμολογία.

Στη συμβατική κβαντομηχανική, τα φερμιόνια (όπως τα ηλεκτρόνια) περιγράφονται από μιγαδικούς τελεστές δημιουργίας $c^\dagger$ και καταστροφής c , οι οποίοι υπακούουν στις σχέσεις αντιμετάθεσης:

$$\{c_i, c_j^\dagger\} = \delta_{ij}, \{c_i, c_j\} = 0 \quad (\text{Π.10})$$

Το 1937, ο Ettore Majorana προέβλεψε την ύπαρξη σωματιδίων τα οποία είναι τα ίδια τα αντισωματίδιά τους. Μαθηματικά, αυτό σημαίνει ότι ο τελεστής Majorana γ είναι αυτοσυζυγής:

$$\gamma = \gamma^\dagger \quad (\text{Π.11})$$

Οπότε, κάθε «συνηθισμένο» φερμιόνιο c μπορεί να αναλυθεί σε δύο τελεστές Majorana, γ_1 και γ_2 , όπου :

$$\gamma_1 = c + c^\dagger \text{ και } \gamma_2 = -i(c - c^\dagger) \quad (\text{Π.12})$$

Οι τελεστές γ_i είναι πραγματικοί και ικανοποιούν τη σχέση:

$$\{\gamma_i, \gamma_j\} = 2\delta_{ij} \quad (\text{Π.13})$$

Αυτό συνεπάγεται ότι $\gamma_i^2=1$, κάτι που σημαίνει ότι η «κατάληψη» μίας κατάστασης Majorana δεν ορίζεται όπως στα συνηθισμένα φερμιόνια.

Όταν μεταφέρουμε τη συζήτηση από τη συμπυκνωμένη ύλη (όπου τα Majorana είναι ημισωματίδια) στα νετρίνα, το ερώτημα γίνεται θεμελιώδες για τη φύση του σύμπαντος: «Είναι το νετρίνο ένα φερμιόνιο Dirac (όπως το ηλεκτρόνιο) ή ένα φερμιόνιο Majorana;». Αν το νετρίνο είναι σωματίδιο Majorana, τότε η ύλη και η αντιύλη στο επίπεδο των νετρίνων ταυτίζονται.

Ένα σωματίδιο Majorana υπακούει στην κλασική εξίσωση Dirac:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \quad (\text{Π.14})$$

αλλά με έναν κρίσιμο περιορισμό στην κυματοσυνάρτησή του. Για να είναι το σωματίδιο Majorana, πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη πραγματικότητας Majorana:

$$\psi = \psi_c = C\bar{\psi}^T \quad (\text{Π.15})$$

όπου ψ_c ο συζυγής σπίνωρας φορτίου (C είναι ο τελεστής συζυγίας φορτίου). Η εξίσωση μας λέει ουσιαστικά ότι το πεδίο είναι ταυτόσημο με το συζυγές του. Αυτό σημαίνει ότι το σωματίδιο δεν μπορεί να φέρει κανένα διατηρήσιμο κβαντικό αριθμό που αλλάζει πρόσημο υπό τη συζυγία φορτίου (όπως το ηλεκτρικό φορτίο).

Στην περίπτωση της διπλής διάσπασης βήτα χωρίς νετρίνα (0νββ), αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στο νετρίνο που εκπέμπεται από ένα νετρόνιο να απορροφηθεί από ένα άλλο ως «αντινετρίνο» (αφού είναι το ίδιο σωματίδιο), επιτρέποντας την αντίδραση. Η διπλή διάσπαση βήτα χωρίς νετρίνα είναι μια πυρηνική μεταστοιχείωση όπου δύο νετρόνια ενός πυρήνα μετατρέπονται ταυτόχρονα σε δύο πρωτόνια, εκπέμποντας μόνο δύο ηλεκτρόνια. Συγκεκριμένα:

$$(A, Z) = (A, Z + 2) + 2e^- \quad (\text{Π.16})$$

Σε αντίθεση με την απλή διπλή διάσπαση βήτα, εδώ δεν εκπέμπονται νετρίνα στο τελικό στάδιο. Αυτό σημαίνει ότι ο λεπτονικός αριθμός L δεν διατηρείται ($\Delta L=2$), το οποίο αν αποδειχθεί πειραματικά, αποτελεί άμεση απόδειξη για φυσική πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο.

Η Λαγκραντζιανή που εισάγει όρους μάζας Majorana (και παραβιάζει τη διατήρηση του λεπτονικού αριθμού), είναι:

$$L_m = -\frac{1}{2}M\bar{\nu}_L^c \nu_L - \frac{1}{2}M^*(\bar{\nu}_L^c \nu_L)^\dagger \quad (\text{Π.17})$$

όπου ν_L το αριστερόστροφο πεδίο του νετρίνου, $\bar{\nu}_L^c$ το συζυγές πεδίο ως προς το φορτίο και M ο συμμετρικός πίνακας μάζας Majorana (βλ. (Π.7)). Ο ενεργός όρος $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ είναι ουσιαστικά το στοιχείο M_{ee} αυτού του πίνακα, δηλαδή το πλάτος της

μετάβασης από ένα ηλεκτρονικό νεutrino σε ένα ηλεκτρονικό αντινεutrino. Σχετίζεται με τις ιδιοτιμές μάζας των τριών τύπων νεutrίνων (m_1, m_2, m_3) και τα στοιχεία του πίνακα μίξης PMNS (U_{ei}). Το γεγονός ότι τα νεutrino έχουν εξαιρετικά μικρή μάζα σε σχέση με τα άλλα σωματίδια εξηγείται κομψά αν υποθέσουμε ότι είναι σωματίδια Majorana μέσω του μηχανισμού seesaw τον οποίο συζητήσαμε στο Παράρτημα Γ και η μάζα τους προκύπτει από την εξίσωση (Π.7).

Ο όρος $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ ορίζεται από τη σχέση:

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right| \quad (\text{Π.18})$$

Αν αναπτύξουμε αυτή τη σχέση, βλέπουμε ότι εξαρτάται από τρεις κύριους παράγοντες: τις μάζες των νεutrίνων m_i (φυσικές μάζες των τριών καταστάσεων), τις γωνίες μίξης (θ_{12}, θ_{13}) (περιέχονται στα στοιχεία U_{ei}) και τις φάσεις Majorana α_1 και α_2 . Αυτές είναι κρίσιμες γιατί επιτρέπουν την παρεμβολή (interference) μεταξύ των όρων. Η πλήρης ανάπτυξη της εξίσωσης (Π.18) είναι:

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = |c_{12}^2 c_{13}^2 m_1 + s_{12}^2 c_{13}^2 m_2 s_{12}^2 e^{i\alpha_1} + s_{13}^2 m_3 e^{i\alpha_2}| \quad (\text{Π.19})$$

όπου $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$ και $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ και $e^{i\alpha}$ είναι οι φάσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε ενισχυτική ή καταστροφική συμβολή. Η τιμή του $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ εξαρτάται άμεσα από τη διάταξη των μαζών (Mass Hierarchy), η οποία παραμένει ένα από τα μεγάλα ερωτήματα της φυσικής. Αν οι μάζες είναι διατεταγμένες με τη σειρά $m_1 < m_2 < m_3$ (Κανονική Ιεραρχία) ο όρος $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ μπορεί να είναι εξαιρετικά μικρός, ακόμα και μηδενικός λόγω καταστροφικής συμβολής των φάσεων. Στην περίπτωση που οι μάζες έχουν τη διάταξη $m_3 < m_1 < m_2$ (Αντίστροφη Ιεραρχία) υπάρχει ένα «κάτω όριο» (περίπου 10–50 meV), το οποίο τα τρέχοντα πειράματα (όπως το LEGEND ή το nEXO) ελπίζουν να ανιχνεύσουν.

Όσον αφορά το πείραμα, αυτό που θα μπορούσαμε να μετρήσουμε είναι ο χρόνος ημιζωής της διπλής διάσπασης βήτα χωρίς νεutrino. Αν θέλουμε να δούμε την εξίσωση που χρησιμοποιούν τα πειράματα για να βρουν τη μάζα, αυτή προέρχεται από τη θεωρία των ασθενών αλληλεπιδράσεων δεύτερης τάξης. Αυτή η εξίσωση, είναι:

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = m_e \sqrt{\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu} \cdot G_{0\nu} \cdot |M_{0\nu}|^2}} \quad (\text{Π.20})$$

Στην εξίσωση αυτή ο όρος $T_{1/2}^{0\nu}$ είναι ο χρόνος ημιζωής, δηλαδή, η πειραματική μεταβλητή, $G_{0\nu}$ είναι ο παράγοντας φάσης (phase space factor) που υπολογίζεται από την QED. Και $M_{0\nu}$ είναι το Πυρηνικό Στοιχείο Πίνακα (Nuclear Matrix Element) που περιγράφει πώς αλληλεπιδρούν τα κουάρκ μέσα στον πυρήνα.

Στην περίπτωση της Κανονικής Ιεραρχίας (Normal Hierarchy), όπου η μάζα m_1 είναι πολύ μικρή, υπάρχει μια περιοχή παραμέτρων όπου ο συνδυασμός των m_1, m_2, m_3 οδηγεί σε $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 0$. Αυτό ονομάζεται «περιοχή χοάνης» (funnel region) και είναι ο εφιάλτης των πειραματικών φυσικών, γιατί ακόμη και αν το νεutrίνο είναι σωματίδιο Majorana, το πείραμα μπορεί να μη δει ποτέ τίποτα!

Αυτή τη στιγμή διεξάγεται ένας παγκόσμιος αγώνας δρόμου, με διαφορετικές τεχνολογίες, ευαίσθητες στην περιοχή ενεργειών της Αντίστροφης Ιεραρχίας. Τέτοια πειράματα διεξάγονται βαθιά κάτω από το έδαφος (σε ορυχεία ή τούνελ) για να αποφευχθεί η κοσμική ακτινοβολία. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε το GERDA/LEGEND (Gran Sasso, Ιταλία), στο οποίο χρησιμοποιούν κρυστάλλους εμπλουτισμένου Γερμανίου (^{76}Ge), το CUORE (Ιταλία), το οποίο χρησιμοποιεί κρυστάλλους διοξειδίου του Τελουρίου (TeO_2) σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν (mK) και το KamLAND-Zen (Ιαπωνία), στο οποίο χρησιμοποιείται ένας τεράστιος ανιχνευτής με υγρό σπινθηριστή και Ξένο (^{136}Xe).

Τέλος, το πείραμα ANITA -το οποίο αναλύσαμε στο κύριο σώμα της μελέτης- ανίχνευσε σωματίδια που έμοιαζαν με νεutrίνα, αλλά φαίνονταν να έρχονται μέσα από τη Γη (προς τα πάνω) με ενέργειες τόσο υψηλές που, σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο, η Γη θα έπρεπε να τα είχε σταματήσει δηλαδή να είχαν απορροφηθεί κατά τη διέλευσή τους στο εσωτερικό της. Κάποιοι ερευνητές (N. Turok, L. Anchordoqui, V. Barger κ.α.) πρότειναν ότι αυτά τα γεγονότα θα μπορούσαν να εξηγηθούν από βαριά σωματίδια Majorana, όπως τα δεξιόστροφα νεutrίνα (sterile neutrinos), τα οποία αποτελούν μέρος του μηχανισμού seesaw και παρέχουν ισχυρές ενδείξεις για το μοντέλο του CPT Symmetric Universe, όπως συζητήσαμε στο κυρίως κείμενο και συναντήσαμε στα προηγούμενα παραρτήματα.

Ο ενεργός μαζικός όρος Majorana $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ είναι το «Άγιο Δισκοπότηρο» της σωματιδιακής φυσικής όσον αφορά τη φύση των νετρίνων, καθώς η ανίχνευσή του θα αποδείκνυε ότι το νεutrino είναι το ίδιο το αντισωματίδιό του. Αν ένα από αυτά τα πειράματα δείξει τελικά ότι $\langle m_{\beta\beta} \rangle \neq 0$, τότε το Καθιερωμένο Πρότυπο θα πρέπει να ξαναγραφτεί από την αρχή. Θα έχουμε αποδείξει ότι η ύλη μπορεί να δημιουργηθεί από το «τίποτα» (παραβίαση λεπτονικού αριθμού).