

## ΤΡΙΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΧΩΡΟΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ\*

*Ἐκ χάεος δ' Ἐρεβός τε μέλαινά τε Νύξ ἐγένοντο  
Νυκτός δ' αὖτ' Αἰθήρ τε καί Ἡμέρη ἐξεγένοντο  
Γαῖα δέ τ' ἄρα πρῶτον μὲν ἐγένετο ἴσον ἐωυτῇ  
Οὐρανὸν ἀστερόενθ', ἵνα μιν περί πάντα καλύπτει  
Ἡσίοδος Θεογονία*

Θά εξετάσουμε τώρα αναλυτικότερα τὸ ρόλο τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς καὶ τῆς βαρυτικῆς ἀλληλεπίδρασης στὴν ἐξέλιξη τῶν ἐννοιῶν τοῦ χώρου, τοῦ χρόνου καὶ τῆς αἰτιότητας. Τὸ πρόβλημα θά ἐξετασθεῖ ἀπὸ τὴν ρελατιβιστικὴ καὶ τὴν μικροφυσικὴ ἄποψη. Ἡ ἀπόπειρα γιὰ μιὰ τέτοια διπλῆ θεώρηση δικαιολογεῖ ἴσως τὸ ὅτι ἐπανέρχομαι σὲ ἓνα θέμα πού ἔχω καὶ ἄλλοτε διαπραγματευθεῖ<sup>1</sup>. Ἐκρῖνα ἐπίσης χρήσιμο νὰ προτάξω ἐδῶ μιὰ σύντομη ἱστορικὴ ἐπισκόπηση.

Τὸ ἐνδιαφέρον γιὰ τίς ρελατιβιστικὲς θεωρίες αὐξήθηκε κατὰ τὰ τελευταῖα ἔτη. Τὰ νέα μέσα παρατήρησης καὶ πειραματισμοῦ ἐπέτρεψαν στοὺς φυσικοὺς νὰ διευρύνουν τὰ ὄρια τοῦ προσιτοῦ τμήματος τοῦ σύμπαντος, καί, σὲ μιὰ ἀντίστροφη κλίμακα, νὰ εἰσδύσουν σὲ περιοχὲς τῆς τάξεως τῶν  $10^{-13}$  ἐκ. Ἀπὸ τὴν ἄλλη πλευρά, ἡ κοσμολογία καὶ ἡ ἀστροφυσικὴ συνδέθηκαν ὀργανικά μὲ τὴ φυσικὴ τῶν «στοιχειωδῶν» σωματίων. Ἡ ἀλληλοδιείσδυση αὐτὴ ὑπῆρξε ἐξαιρετικὰ γόνιμη. Ὁ χαρακτήρας τῶν θεωριῶν πού ἐπιχειροῦν νὰ ἐρμηνεύσουν αὐτὰ τὰ φαινόμενα εἶναι ρελατιβιστικὸς. Ἀλλὰ οἱ ἐννοιες τοῦ χώρου καὶ τοῦ χρόνου ἀποτελοῦν κεντρικὲς ἐννοιες τῆς θεωρίας τῆς σχετικότητας. Ἐτσι ἡ προβληματικὴ γύρω ἀπ' αὐτὲς τίς ἐννοιες πλουτίστηκε ἀπὸ τὴν διερεύνηση τῶν νέων προβλημάτων.

\* Τὸ κεφάλαιο αὐτὸ ἀποτελεῖ τὸ πρῶτο μέρος μελέτης πού δημοσιεύθηκε στὸν τόμο, *Κεφάλαια Φιλοσοφίας*, τοῦ Κέντρου φιλοσοφικῶν ἐρευνῶν, Δωδώνη, 1979. Τὸ ἀρχικὸ κείμενο βελτιώθηκε καὶ συμπληρώθηκε σὲ πολλὰ σημεία.

1. Βλ. Ε. Μπιτσάκη. 1) *Διαλεκτικὴ καὶ Νεώτερη Φυσικὴ* (2η ἔκδοση) Ἡριδανός 1975. 2) *Τὸ εἶναι καὶ τὸ γίνεσθαι* (2η ἔκδοση), Δωδώνη, 1975.

### 3.1. Σύντομη ιστορική εισαγωγή

Τό κοσμολογικό πρόβλημα, και ειδικότερα τό πρόβλημα τοῦ χώρου και τοῦ χρόνου, ἀποτελεῖ κεντρικό ἐρώτημα κάθε κοσμοαντίληψης, μυθολογικῆς ἢ «ὀρθολογικῆς».

Κάθε ἀρχαῖος λαός εἶχε κάποια κοσμολογία. Οἱ ῥῆλληνες, φυσικά, δέν ἀποτελοῦν ἐξαιρεση. Ἀπό τόν ῥΑριστοφάνη και ἄλλες πηγές μαθαίνουμε, λ.χ., ὅτι κατά τούς ὀρφικούς στήν ἀρχή ὑπῆρχε τό Χάος και ἡ Νύχτα και τό μαῦρο ῥΕρεβος και ὁ εὐρύς Τάρταρος. ῥΑλλά οὔτε γῆ, οὔτε ἀέρας, οὔτε οὐρανός ὑπῆρχαν. Μέσα στούς ἄπειρους κόλπους τοῦ σκοτούς ἢ μελανόπτερη Νύκτα γέννησε, κατά τό μῦθο, ἕνα ἄσπορο αὐγό, ἀπ' ὅπου γεννήθηκε τήν κατάλληλη ὠρα ὁ ῥΕρωτας. Και τά Πουλιὰ τοῦ ῥΑριστοφάνη συνεχίζουν: ῥΟ ῥΕρωτας, σμίγοντας τή νύχτα μέ τό φτερωτό κενό, ἔκανε νά γεννηθεῖ τό δικό μας γένος και τό ἔφερε γιά πρώτη φορά στό φῶς. Προτοῦ τά σμίξει ὄλα ὁ ῥΕρωτας, δέν ὑπῆρχε τό γένος τῶν θεῶν. Μέ τό σμίξιμο διαφορετικῶν πραγμάτων, γεννήθηκαν ὁ Οὐρανός και ὁ ῥΩκεανός και ἡ Γῆ και ὄλο τό ἀθάνατο γένος τῶν Θεῶν<sup>2</sup>.

ῥῬ κοσμογονία τοῦ ῥῬσιόδου δέν εἶναι πολύ διαφορετική. Κι ἐδῶ ἀπό τό Χάος γεννήθηκαν τό ῥΕρεβος και ἡ μελανή Νύκτα. ῥΑπό τή Νύκτα πάλι γεννήθηκαν ὁ Αἰθέρας και ἡ ῥῬμέρα. ῥῬ Γῆ μέ τή σειρά της γέννησε ἕνα ὄν ἴσο μέ τόν ἑαυτό της, τόν ἑναστρο Οὐρανό, πού τή σκέπασε ὄλόκληρη και πρόσφερε ἔτσι στούς θεούς μιά παντοτινά σίγουρη κατοικία.<sup>3</sup>

ῥΑνάλογες ποιητικές - μυθολογικές κοσμογονίες θά συναντήσει κανείς σέ πολλούς λαούς. Πιό γνώριμοι μᾶς εἶναι οἱ Αἰγυπτιακοί και οἱ Βαβυλωνιακοί μῦθοι, πού σχετίζονται ὄχι μόνο μέ τούς ἑλληνικούς, ἀλλά και μέ ὄρισμένες φιλοσοφικές ἀντιλήψεις τῶν ῥῬώνων. Τό χαρακτηριστικό αὐτῶν τῶν κοσμολογιῶν, εἶναι ὅτι βλέπουν τή φύση σάν αὐτοαναπτυσσόμενο ὄλον. Βέβαια δέχονται τήν ὑπαρξη τῶν θεῶν. ῥῬστόσο οἱ θεοί γεννήθηκαν ἀπό τή Φύση. Δέν εἶναι ὄντα ἐξωφυσικά ἢ ὑπερφυσικά, και πολύ περισσότερο δέν εἶναι οἱ δημιουργοί τῆς φύσης. ῥῬξαιρεση σ' αὐτές τίς κοσμογονίες θά ἀποτελέσει ἡ Παλαιὰ Διαθήκη, ὄπου καταγράφηκαν ἀρχαῖοι ῥῬβραϊκοί μῦθοι και ὄπου ἐμφανίζεται πλέον ἡ ἔννοια τοῦ Δημιουργοῦ<sup>4</sup>.

2. ῥΑριστοφάνη, ῥῬρνιθες, στ. 693 κ.ἔ.

3. ῥῬσιόδου, ῥῬεογονία, στ. 123 κ.ἔ. ῥῬπίσης Ε. Ροῦσσο, στό *Κεφάλαια Φιλοσοφίας Δωδώνη*, 1979.

4. Βλ. Ε. Thomson, *The First Philosophers*, Lawrence and Wishart, 1972. ῥῬπίσης Ε. Bitsakis, *Nature in Greek Philosophy*, Scientia, 109, 647 (1974). (ῥῬλληνικό κείμενο στό βιβλίο: ῥῬ φύση στη Διαλεκτική Φιλοσοφία, (2η ῥῬκδοση, Σύγχρονη ῥῬποχή, 1978).

Μέ τήν ανάπτυξη τῆς ἀρχαίας ἑλληνικῆς φιλοσοφίας, τό πρόβλημα ἀντιμετωπίστηκε γιά πρώτη φορά ὀρθολογικά. Στήν ἑλληνική φιλοσοφία διαμορφώθηκαν δύο βασικές γραμμές, πού, μέσα ἀπό διαδοχικές ἐπιστημικές μεταλλαγές, ὀδηγοῦν στήν ἐπιστήμη τῶν ἡμερῶν μας.

Κατά τούς ἀτομικούς, ἡ καθῶς εἶναι γνωστό, τό σύμπαν ἀποτελεῖται ἀπό τά ἄτομα καί τό κενό (τό ὄν καί τό μή ὄν), καί εἶναι ἄπειρο, τόσο χρονικά ὅσο καί σέ ἔκταση. Ἐδῶ βρίσκουμε μιά πρώτη διατύπωση τῆς μεταφυσικῆς τοῦ χώρου, πού θεωρεῖται μορφή ἀνεξάρτητη ἀπό τό περιεχόμενό της, καθῶς καί τῆς μεταφυσικῆς τοῦ χρόνου, πού συνδέεται μέ τήν κίνηση, κι' ὥστόσο εἶναι ὁ αὐτός γιά ὅλα τά σημεῖα τοῦ σύμπαντος.

Τίς ἀντιλήψεις αὐτές τίς ξαναβρίσκουμε στόν Λουκρήτιο, στόν Gassendi, καί σέ ἄλλους νεώτερους. Ὁ Νεύτωνας ἐπρόκειτο νά τίς ἐνσωματώσει σέ μιά πρώτη φυσικομαθηματική ἀντίληψη γιά τή φύση.

Κατά τόν Παρμενίδα, τόν Πλάτωνα καί κυρίως τόν Ἀριστοτέλη, ἡ ὕλη συνδέεται ὀργανικά μέ τό χῶρο. Τό κενό γι' αὐτούς τούς φιλόσοφους εἶναι ἀδιανόητο. Ὁ Καρτέσιος, μετά ἀπό 2.000 χρόνια, ἐπρόκειτο νά ἀναπτύξει μιά ἀνάλογη ἀντίληψη, καί οἱ ρελατιβιστικές καί πεδιακές θεωρίες διαμόρφωσαν στίς μέρες μας ἐπιστημονικές ἀντιλήψεις γιά τίς σχέσεις χώρου, χρόνου καί ὕλης, σύμφωνες μ' αὐτή τή γραμμή.

Ὁ Ἀριστοτέλης προοιωνίζει ἀπό μιά ἄποψη, καί σέ ἕνα ἐπιστημικό πλαίσιο ποιοτικά διαφορετικό, τόν Καρτέσιο καί τόν Ἀινστάιν. Ὡστόσο, στό γεωκεντρικό καί αὐστηρά ἱεραρχημένο σύμπαν του, ὑπάρχει ἕνας *τόπος προνομιοῦχος*: ἡ γῆ. Τό προνομιοῦχο αὐτό σύστημα ἀναφορᾶς ἀντιστοιχεῖ στό ἀπόλυτο σύστημα ἀναφορᾶς τοῦ Νεύτωνα, ἔστω κι ἂν ἀπό τήν ἐποχή τοῦ Κοπέρνικου δέν ὑπάρχει πλέον κάποιο ἀκίνητο κέντρο τοῦ κόσμου. (Ἀξίζει νά σημειωθεῖ ὅτι ἤδη οἱ Πυθαγόρειοι δίδασκαν πῶς ἡ γῆ στρέφεται γύρω ἀπό ἕνα κεντρικό πῦρ, τήν *ἐστία τοῦ παντός*, καί φυσικά εἶναι γνωστές οἱ ἡλιοκεντρικές ἀντιλήψεις τοῦ Ἀρίσταρχου τοῦ Σάμιου καί τό μικτό σύστημα τοῦ Ἡρακλείδη τοῦ Ποντικοῦ).<sup>5</sup>

Ὑστερα ἀπό μακρά συσσώρευση πειραματικῶν δεδομένων καί θεωρητικῶν γενικεύσεων (Κοπέρνικος, Tycho Brahe, Γαλιλαῖος, Κέπλερ, Καρτέσιος, κλπ.)<sup>6</sup>, ὁ Νεύτωνας διατύπωσε μέ σαφήνεια τόν

5. Βλ. σχετικά: (1) Diels - Kranz. *Die Fragmente der Vorsokratiker*. Weidmannsche Ver. 1961. (2) Ἀριστοτέλη, *Φυσικά καί Μετά τά Φυσικά*. (3) Σταμάτη, *Προσωκρατικοί Φιλόσοφοι*. Ἀθήνα, 1966.

6. Βλ. A. Dreyer, *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, Dover Publ.

έννοιολογικό πυρήνα της μηχανικής, και έδωσε μιά πρώτη μαθηματική μορφή στους νόμους της.

Κι έδω ή φύση αποτελείται από τήν ύλη (σωματίδια συμπαγή, άτμητα και άφθαρτα, όπως και στους αρχαίους ατομικούς) και τό κενό. Ο χώρος είναι άπειρος σέ έκταση, όπως ένα κενό δοχείο πού δέχεται τήν ύλη. Η μηχανιστική σχέση χώρου και ύλης είναι τώρα περισσότερο σαφής και δέχεται ένα μεταφυσικό συμπλήρωμα: τήν πράξη της δημιουργίας.

Ωστόσο ο χώρος και ο χρόνος δέν είναι πλέον άσαφείς φιλοσοφικές κατηγορίες. Παρά τό θεολογικό περίβλημα, έχουν μεταλλαγει σέ έννοιες επιστημονικές. Ο πραγματικός χώρος είναι ο *άπόλυτος χώρος* «χωρίς σχέση μέ τά έξωτερικά πράγματα», και παραμένει «όμοιος μέ τόν έαυτό του και άκίνητος». Αντίστοιχα, ο άληθινός και μαθηματικός χρόνος είναι ο *άπόλυτος χρόνος*, «πού είναι άσχετος μέ ότιδήποτε έξωτερικό και ρέει όμοιόμορφα».

Έτσι στον άπόλυτο, άμορφο χώρο, πού έχει παντού τις ίδιες ιδιότητες, αντιστοιχεί ένας μοναδικός και παγκόσμιος χρόνος, πού επιτρέπει νά όρίσουμε μέ τρόπο άπόλυτο τή χρονική τάξη (και τό ταυτόχρονο) τών γεγονότων. Μέ τή βοήθεια τών δυό αυτών έννοιών όρίζεται ή *άπόλυτη κίνηση*, πού «είναι ή μετάβαση ενός σώματος από μιά άπόλυτη θέση, σέ μιά άλλη άπόλυτη θέση».<sup>7</sup>

Ο άπόλυτος χώρος και ο άπόλυτος χρόνος αποτελούν τό θεμέλιο της βασικής αρχής της μηχανικής: *της αρχής της αδράνειας* (τήν όποία είχε διατυπώσει ως γνωστόν ο Άριστοτέλης, για νά τήν άπορρίψει μαζί μέ τήν έννοια του κενού). Φυσικά ο Νεύτωνας γνώριζε πόσο ήταν δύσκολο νά βρεθεί κάποιο ούράνιο σώμα άκίνητο ως προς τόν άπόλυτο χώρο, πού θά αποτελούσε τό άπόλυτο σύστημα, και μέ βάση τό όποίο θά όρίζονταν τά συστήματα αδράνειας και θά έπαληθεύονταν οί νόμοι της μηχανικής. Η κεντρική έννοια, τέλος, πού υποβαστάζει όλο τό οικοδόμημα, είναι καθώς έχουμε αναλύσει, ή έννοια της στιγμιαίας δράσης από άπόσταση, δηλαδή ή έννοια της άλληλεπίδρασης μέ άπειρη ταχύτητα.

Μέ τή διατύπωση τών μετασχηματισμών του Γαλιλαίου και ευρύτερα της αναλυτικής μηχανικής (19ος αιώνας) όλοκληρώθηκαν οί έννοιολογικές βάσεις και ή μαθηματική δομή αυτής της επιστήμης.

Ο χώρος της κλασικής φυσικής είναι ένας τρισδιάστατος *εύκλειδεις* χώρος, δηλαδή ένας χώρος μέ θετική και άμετάβλητη μετρική.<sup>8</sup>

7. I. Newton, Principia, Univ. of California Press, και Opticks, Dover Publ.

8. Ο θεμελιώδης μετρικός τανυστής - τό μαθηματικό όν πού καθορίζει τις βασικές ιδιότητες του χώρου - έχει τή μορφή:  
 $g_{\mu\nu} = \delta_{\mu\nu}$ , 1 αν  $\mu = \nu$ , 0 αν  $\mu \neq \nu$ .



\* Η μετρική αυτή εκφράζει τήν ανεξαρτησία του χώρου από τό χρόνο, καί τήν ανεξαρτησία του χώρου από τήν ύλη. \* Εκφράζει επίσης τήν ομοιογένεια καί τήν ισοτροπία του χώρου: τό γεγονός ότι είναι ένας χώρος επίπεδος, χωρίς δομή. Συνεπάγεται τέλος τήν άπειρότητα του χώρου καί προϋποθέτει τή στιγμιαία δράση από άπόσταση καί συνεπώς τήν ύπαρξη ενός μοναδικού, παγκόσμιου χρόνου.

### 3.2. Τό άπόλυτο πλαίσιο καί ό ήλεκτρομαγνητισμός

\* Η έννοια τής σχετικότητας συνδέθηκε μέ τό έργο του \* Αϊνστάιν. \* Ωστόσο πριν από τήν ειδική θεωρία τής σχετικότητας, υπήρχε ή κλασική άρχή τής σχετικότητας (του Γαλιλαίου). Σύμφωνα μέ αυτή τήν άρχή, οί ιδιότητες του χώρου καί του χρόνου, καθώς καί οί νόμοι τής μηχανικής παραμένουν άμετάβλητοι, όταν περνάμε από ένα σύστημα αδράνειας σέ ένα άλλο. *Σχετικότητα* λοιπόν σημαίνει, ήδη από τήν εποχή αυτή, *άμεταβλητότητα* τής μορφής των νόμων τής μηχανικής (ανεξαρτησία από τό σύστημα αναφοράς), δηλαδή μή *σχετικότητα*. Καθώς έγραφε ό P. Langevin τό 1922, «ή άμεταβλητότητα αυτή των νόμων τής Μηχανικής μεταφράζεται μέ τή δυνατότητα νά δοθοϋν ένδογενείς διατυπώσεις χάρη στην είσαγωγή στοιχείων *διανυσματικών* (ταχύτητα, επιτάχυνση, δύναμη, άξονες ζευγών, ποσότητα κίνησης), *τανυστικών* (ροπή αδράνειας, έλαστικές παραμορφώσεις, ήλεκτρικές τάσεις, κλπ.), ή *βαθμωτών* (μάζα, ενέργεια, κλπ.), χωρίς νά επεμβαίνουν οί ειδικές συντεταγμένες σέ ένα σύστημα αναφοράς, τό ίδιο όπως καί τά άμετάβλητα μεγέθη τής καθαρής Γεωμετρίας (άποστάσεις, γωνίες, επιφάνειες, όγκοι, κλπ.) επιτρέπουν νά διατυπώσουμε τους νόμους αυτής τής επιστήμης μέ μορφή ανεξάρτητη από κάθε σύστημα αναφοράς».<sup>9</sup>

\* Αλλά ή κλασική σχετικότητα προϋποθέτει ότι μπορούμε νά όρίσουμε μία ειδική τάξη *προνομιούχων* συστημάτων: τά συστήματα *αδράνειας*, δηλαδή τά συστήματα πού κινούνται ευθύγραμμα καί ομαλά ως προς τόν άπόλυτο χώρο. \* Έτσι ό *άπόλυτος* χώρος είναι προϋπόθεση τής *ισχύος* τής *άρχης* τής *αδράνειας* καί, *μαζί μ' αυτήν*, *όλόκληρης* τής *κλασικής μηχανικής*.

Οί τιμές των διανυσμάτων βάσεως είναι συνεπώς οί αυτές σέ όλα τά σημεία του χώρου. \* Η άπόσταση ανάμεσα σέ δύο σημεία  $A \neq B$  είναι πάντα θετική καί ανεξάρτητη από τό σύστημα αναφοράς ή τήν περιοχή του χώρου. Για ένα άπειροστό διάστημα έχουμε:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$$

\* Η μετρική δηλαδή είναι καθορισμένη - θετική.

9. P. Langevin, *Le principe de Relativité*, Chiron, 1922, σελ. 13.

Ὡστόσο ἡ πλήρης ἰσοδυναμία τῶν συστημάτων ἀδράνειας δέν ἐπιτρέπει νά ἀπομονώσουμε κάποιο ἀπόλυτο σύστημα, στό ὁποῖο θά ἀναφέραμε τά ὑπόλοιπα. Γιά μιά περίοδο (δεύτερο μισό τοῦ περασμένου αἰῶνα) οἱ φυσικοὶ ἔλπισαν ὅτι θά μπορούσαν νά διαπιστώσουν πειραματικά τήν κίνηση τῆς γῆς μέσα ἀπό τόν ἀκίνητο ὠκεανό τοῦ αἰθέρα, δηλαδή τήν ἀπόλυτη κίνησή της. Τό πείραμα διάψευσε καί αὐτή τήν προσδοκία. Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας ἀπόρριψε, ὅπως εἶναι γνωστό, τό ὄλο πρόβλημα, καί μαζί του τίς ἔννοιες τοῦ ἀπόλυτου χώρου καί χρόνου. Τά λεπτεπίλεπτα φαινόμενα τοῦ ἠλεκτρομαγνητισμοῦ ἐξάρθρωσαν λοιπόν τό «αἰώνιο» οἰκοδόμημα τῆς μηχανιστικῆς ἀντίληψης, πού διαμορφώθηκε μέσα ἀπό τή μελέτη τῆς κίνησης μακροσκοπικῶν σωμάτων.

Ἡ εἰδική θεωρία τῆς σχετικότητας γεννήθηκε μέσα σ' ἕνα ὀρισμένο ἐπιστημονικό κλίμα, ξεπερνώντας τίς ἀντιθέσεις ἀνάμεσα στό παλαιό, ἀπόλυτο χωροχρονικό πλαίσιο, καί στά νέα δεδομένα πού προέρχονταν ἀπό τό χῶρο τοῦ ἠλεκτρομαγνητισμοῦ.

Θά ἀναφερθοῦμε τώρα στούς προδρόμους τῆς σχετικότητας, ὄχι γιά νά ἀπαντήσουμε στό δύσκολο - καί ἀδιάφορο γιά τό θέμα μας - ἐρώτημα, γιά τό τί πῆρε ὁ Ἄιστῆιν ἀπ' αὐτές τίς ἐργασίες, ἀλλά γιά νά σκιαγραφήσουμε τή γένεση μιᾶς ἐπιστήμης, μέσα σ' ἕνα καθορισμένο ἐπιστημολογικό χῶρο.

Ἡ μηχανική μελέτησε κυρίως τήν κίνηση τοῦ ὕλικου σημείου, καί σέ μιά ἄλλη κλίμακα τήν κίνηση τῶν οὐρανίων σωμάτων (οὐράνια μηχανική) καθώς καί τά κυματικά φαινόμενα. Ἦδη ὁ Huygens, ἀντίθετα μέ τόν Νεύτωνα, ὑποστήριζε ὅτι τό φῶς εἶναι κυματικό φαινόμενο, καί ἡ κυματική θεωρία ἐπιβλήθηκε καθώς εἶναι γνωστό ἀπό τίς ἀρχές τοῦ 19ου αἰῶνα.<sup>10</sup> Ἀλλά μέ τό ἔργο κυρίως τῶν Faraday καί Maxwell, μιά νέα πραγματικότητα εἰσῆλθε στό χῶρο τῆς φυσικῆς: τό ἠλεκτρομαγνητικό πεδίο (τό φῶς εἶναι ἠλεκτρομαγνητική διαταραχή), δηλαδή μιά φυσική ἀλληλεπίδραση πού δέν μεταδίδεται μέ ἄπειρη, ἀλλά μέ πεπερασμένη ταχύτητα ( $c = 3 \times 10^{10}$  cm / sec). Οἱ σύγχρονοι τοῦ Maxwell, ὅπως ἄλλωστε καί ὁ ἴδιος, συνέχιζαν νά βλέπουν τό ἠλεκτρομαγνητικό πεδίο σάν διαταραχή ἑνός ὑποθετικοῦ μέσου, τοῦ αἰθέρα, πού ταυτίστηκε μέ τόν ἀπόλυτο χῶρο τοῦ Νεύτωνα.

Πρός τό τέλος τοῦ περασμένου αἰῶνα εἶχαν μελετηθεῖ πολλές ὄψεις τῶν ἠλεκτρομαγνητικῶν φαινομένων. Ἦδη τό 1902 - 1903, ὁ M. Abraham μιλοῦσε γιά ἠλεκτρομαγνητική μάζα τοῦ ἠλεκτρονίου μέ δύο

10. Ch. Huygens, Treatise on Light, Dover Publ. καί I. Newton, Opticks, op. cit.

συνιστώσες, μιά κατά τήν κατεύθυνση τής κίνησης και μιά κάθετη, και για εξάρτηση τής μάζας από τήν ταχύτητα. Μελετώντας τή θεωρία τής ακτινοβολίας, κατάληξε σέ συμπεράσματα ισοδύναμα, από μαθηματική άποψη, μέ τόν 'Αϊνστάιν, και είναι περίπου βέβαιο ότι ο τελευταίος γνώριζε αυτές τις εργασίες και ενισχύθηκε στις απόψεις του<sup>11</sup>. Στην ίδια περίοδο τό Poincaré είχε καταλήξει στό συμπέρασμα ότι ή μάζα είναι συνάρτηση τής ταχύτητας. Τα πειράματα του W. Kaufmann (1901) έδειχναν ότι πράγματα ή μάζα του ήλεκτρονίου αυξάνει μέ τήν ταχύτητα. Τό 1905 ο P. Langevin, χωρίς νά γνωρίζει τις εργασίες του 'Αϊνστάιν, κατάληξε στό συμπέρασμα ότι «ή μάζα πρέπει νά θεωρηθεί συνάρτηση τής ταχύτητας».<sup>12</sup> Επίσης τόν ίδιο χρόνο κατάληξε σ' έναν τύπο για τις σχέσεις μάζας - ενέργειας, ταυτόσημο μέ τό γνωστό τύπο τής Σχετικότητας, αλλά δέν δημοσίευσε αυτό τό αποτέλεσμα, γιατί αντίληφθηκε τό γενικότερο χαρακτήρα τής εργασίας του 'Αϊνστάιν<sup>13</sup>. Τέλος ο Lorentz διέβλεψε, από τό 1899, τή δυνατότητα νά θεωρηθεί ή μάζα του ήλεκτρονίου συνάρτηση τής ταχύτητάς του.

Τό δεύτερο μεγάλο πρόβλημα πού απασχολούσε τότε τούς φυσικούς, ήταν ή δυνατότητα νά ανακαλυφθεί ή απόλυτη κίνηση τής γής μέ τή βοήθεια τών ήλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων. Πραγματικά, αν ή γή κινείται σχετικά μέ τόν αἰθέρα, θά έπρεπε, κατά τήν κλασική μηχανική, τά αποτελέσματα αὐτῆς τής κίνησης νά είναι αἰσθητά. "Αν, λ.χ., κινείται ὡς πρὸς μιά φωτεινή πηγή, τότε ή ταχύτητα του φωτός θά έπρεπε νά είναι:  $c' = c \pm v$ , ὅπου  $v$  ή σχετική ταχύτητα πηγῆς - παρατηρητῆ. Είναι γνωστό ότι τά πειράματα τῶν Michelson - Morley, πού ἐπαναλήφθηκαν ἀπό πολλούς πειραματιστές, ἔδωσαν κατηγορηματική ἀπάντηση: 'Η ταχύτητα του φωτός είναι σταθερή· δέν ἐξαρτᾶται ἀπό τή σχετική κίνηση πηγῆς - παρατηρητῆ.

Γιά νά ἐξηγηθεῖ τό ἀρνητικό αποτέλεσμα του πειράματος Michelson - Morley, διατυπώθηκαν πολλές ὑποθέσεις, ὅλες μέσα στά κλασικά χωροχρονικά πλαίσια. Αὐτή πού μᾶς ἐνδιαφέρει ἐδῶ είναι ή ὑπόθεση Fitzgerald - Lorentz, σύμφωνα μέ τήν ὁποία «οἱ διαστάσεις τῶν στερεῶν τροποποιοῦνται ἑλαφρῶς ἀπό τήν κίνησή τους μέσα ἀπό τόν αἰθέρα». Γενικεύοντας, ο Lorentz εἰσήγαγε μιά νέα ὁμάδα μετασχηματισμῶν (πού φέρουν τό ὄνομά του και πού δίνουν μιά ἐξήγηση στό αποτέλεσμα του πειράματος Michelson - Morley, ὑποθέτοντας μιά συστολή του μήκους και μιά διαστολή του χρόνου, σά συνέπεια τής σχετικῆς κίνησης συστήματος - παρατηρητῆ.<sup>14</sup>

11. A. I. Miller, Am. Journal of Phys., 44, 912/1976.

12. P. Langevin, Oeuvres Completes, CNRS, σελ. 324.

13. E. Bauer, La Pensée, 161, 1972.

14. Βλ. τό κείμενο του Lorentz, στη συλλογή: The Principle of Relativity, Dover Publ.



Οι μετασχηματισμοί που χρησιμοποίησε ο 'Αϊνστάιν στην ειδική θεωρία της σχετικότητας, είναι οι μετασχηματισμοί Lorentz. Σύμφωνα με όλα τα δεδομένα ο 'Αϊνστάιν δέν γνώριζε τήν ύπαρξη αυτών των μετασχηματισμών, που είχαν διατυπωθεί ένα χρόνο νωρίτερα<sup>15</sup>. 'Αλλά, όπως φαίνεται από τήν πρώτη τού εργασία για τή σχετικότητα, ο 'Αϊνστάιν γνώριζε τό άρνητικό αποτέλεσμα του πειράματος Michelson - Morley.

'Ωστόσο από τή μελέτη των αρχείων του 'Αϊνστάιν, τεκμηριώνεται πιθανόν ή αντίθετη άποψη. 'Ετσι σε σχετικό άρθρο του ο W. Sullivan γράφει ότι νομίζεται γενικά πως ο 'Αϊνστάιν ενδιαφερόταν κυρίως νά λύσει τό πρόβλημα που άφορούσε τή διάδοση του φωτός, όπως πρόκυψε από τό πείραμα Michelson - Morley. 'Αλλά, συνεχίζει ο Sullivan, ο 'Αϊνστάιν, σ' ένα γράμμα του (στόν ιστορικό Davenport), γράφει ότι άμφιβάλλει άν γνώριζε τά πειράματα Michelson - Morley, όταν διατύπωσε τή θεωρία της σχετικότητας. «Αυτό που κυρίως προκάλεσε τόν 'Αϊνστάιν, ήταν τό σχετικό πρόβλημα που προκύπτει από τή θεωρία του Maxwell για τά ήλεκτρικά φαινόμενα, και τή σχέση τους με τά κύματα του φωτός». 'Ο 'Αϊνστάιν, καταλήγει ο Sullivan, «πέτυχε μιά ένιαία διατύπωση των ήλεκτρομαγνητικών φαινομένων, εφαρμόσιμη σε κάθε σχετική κίνηση. Μ' αυτό τόν τρόπο έλυσε τό δίλημμα που αντιπροσωπεύει τό πείραμα Michelson - Morley, έστω κι άν δέν γνώριζε τό ίδιο τό πείραμα».<sup>16</sup> 'Ωστόσο στο κείμενο που θεμελίωσε τή σχετικότητα, ο 'Αϊνστάιν γράφει για άνεπιτυχείς άπόπειρες νά ανακαλυφθεί κάποια κίνηση της γής σχετικά με τό «έλαφρό μέσον», κι αυτό είναι μιά ένδειξη που αντιφάσκει με τήν προηγούμενη.<sup>17</sup>

'Οπωςδήποτε, τό αποτέλεσμα του πειράματος Michelson - Morley δέν ήταν τό κύριο αντικείμενο της εργασίας του 'Αϊνστάιν. Κυρίως τόν ενδιέφερε νά άρει τίς άσυμμετρίες που παρουσίαζαν τά ήλεκτρομαγνητικά φαινόμενα στο κλασικό χωροχρονικό πλαίσιο. Ξεκινώντας από τήν τυπική άσυμμετρία των εξισώσεων του Maxwell ως προς τούς μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου, θά άνέτρεπε τό κλασικό χωροχρονικό πλαίσιο και ταυτόχρονα θά άνοιγε τό δρόμο για μιά νέα προσπέλαση στο μικρόκοσμο, στηριγμένη στη θεωρία της σχετικότητας.

'Η πειραματική και θεωρητική μελέτη των νέων (τότε) ήλεκτρομαγνητικών φαινομένων, οδηγούσε από πολλούς δρόμους προς τή

15. H. M. Schwartz, American Journal of Physics, 45, 19 (1977).

16. New York Times, 28 Μαρτίου 1972.

17. A. Einstein, in: The Principle of Relativity, Dover Publ.



σχετικότητα. Γιατί όμως οι μεγάλοι φυσικοί της εποχής άποτυχαν, εκεί που πέτυχε ο νεαρός 'Αϊνστάιν; Δέν είναι δύσκολο νά δει κανείς ότι όλοι προσπαθούσαν νά ένσωματώσουν τά νέα φαινόμενα στό παλαιό, άπόλυτο, χωροχρονικό πλαίσιο. Έτσι όλοι κατάληξαν σέ επιμέρους ρελατιβιστικές σχέσεις, χωρίς νά μπορέσουν νά συλλάβουν τό νέο έννοιολογικό πλαίσιο.

Εϊδικά ο Ροϊνσαρέ είχε συλλάβει ρελατιβιστικές όψεις τών φαινομένων, γνώριζε τούς μετασχηματισμούς Lorentz και είχε καταλήξει σέ σχέσεις ρελατιβιστικής κινηματικής και δυναμικής. Πώς τότε μπόρεσε, διερωτάται ο Louis de Broglie, νά αφήσει νά του διαφύγει «ή μεγάλη σύνθεση που έκανε άθάνατο τό όνομα του 'Αϊνστάιν»; «Ο Ροϊνσαρέ, συνεχίζει ο de Broglie, είχε μιά στάση κάπως σκεπτικιστική άπέναντι στις φυσικές θεωρίες, πιστεύοντας ότι ύπάρχει γενικά μιά άπειρότητα διαφορετικών άπόψεων, εικόνων ποικίλων, που είναι λογικά ίσοδύναμες, κι άνάμεσα στις όποιες ο έπιστήμονας δέν επιλέγει παρά για λόγους βολικότητας. Ο νομιναλισμός αυτός φαίνεται ότι τόν έκανε νά παραγνωρίσει μερικές φορές τό γεγονός ότι άνάμεσα στις λογικά δυνατές θεωρίες ύπάρχουν αυτές που είναι πιο κοντά στή φυσική πραγματικότητα.» Αν αυτή ή άποψη είναι όρθή, τότε ή φιλοσοφική τάση του πνεύματός του προς ένα νομιναλισμό της βολικότητας, έμπόδισε τόν Ροϊνσαρέ νά διακρίνει σέ όλο της τό εύρος τή σημασία της ίδιας της Σχετικότητας». <sup>18</sup>

Εϊναι φανερό από τά προηγούμενα, ότι τόσο οι μηχανιστικές αντιλήψεις για τό χώρο και τό χρόνο, όσο και ή φιλοσοφία του θετικισμού, ύπήρξαν ένα επιστημολογικό έμπόδιο στή διατύπωση της θεωρίας της σχετικότητας. Τέτοια παραδείγματα βρίσκει κανείς συχνά στην ιστορία της σύγχρονης φυσικής. (Άρκει νά θυμίσουμε - από μιά άλλη περιοχή - τήν άδιαφορία μέ τήν όποία αντιμετώπισε ο N. Bohr τήν ύπόθεση του Yukawa για τήν ύπαρξη του μεσονικοϋ πεδίου, φορέα τών ισχυρών άλληλεπιδράσεων). Ωστόσο, κατά μιά παράδοξη, αλλά όχι άκατανόητη συγκυρία, ένας άλλος θετικιστής, ο E. Mach, βοήθησε τόν 'Αϊνστάιν νά άπορρίψει τό κλασικό χωροχρονικό πλαίσιο.

Πράγματι, ο Mach είχε κάνει στή *Μηχανική* του μιά τολμηρή και βαθειά επιστημολογική άνάλυση τών αντιλήψεων του Νεύτωνα για τό χώρο, τό χρόνο, τή μάζα και τήν κίνηση, και είχε φανερώσει τήν άνεπάρκεια και τίς αντιφάσεις τους. Κατά τόν Mach δέν έχει νόημα νά μιλάμε για άπόλυτο χώρο, άπόλυτο χρόνο και άπόλυτη κίνηση. «Για

18. *Intéret et enseignements de l'histoire des Sciences*. (Πρόκειται για διάλεξη στην Association Paul Langevin, της όποιας τό δακτυλογραφημένο κείμενο μου παραχώρησε ο καθηγητής P. Biquard. Δέν γνωρίζω αν τό κείμενο αυτό έχει δημοσιευτεί).

μένα, γράφει, μόνον οί σχετικές κινήσεις υπάρχουν». Οί θεμελιώδεις αρχές τής Μηχανικῆς προέρχονται, κατά τόν Mach, ἀπό πειράματα πάνω στις σχετικές θέσεις καί κινήσεις τῶν σωμάτων<sup>19</sup>.

Ὁ Ἀϊνστάιν ἀναγνώρισε σέ πολλές περιπτώσεις τήν επίδραση τῆς φιλοσοφίας τοῦ Mach στή σκέψη του. «Ὁ Mach εἶναι αὐτός, γράφει, πού στήν *Ἱστορία τῆς Μηχανικῆς* συγκλόνησε αὐτή τή δογματική πίστη», δηλαδή τήν πίστη στήν αἰωνιότητα τοῦ νευτώνιου χωροχρονικοῦ πλαισίου. Γιατί ὁ Mach ἀναγνώρισε τά ἀδύνατα σημεῖα τῆς κλασικῆς μηχανικῆς καί κατά τόν Ἀϊνστάιν θά μπορούσε νά ἔχει διατυπώσει τή θεωρία τῆς σχετικότητας, ἂν στήν ἐποχή του συζητιόταν ἀνάμεσα στους φυσικούς τό πρόβλημα τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός<sup>20</sup>.

Αὐτό, ὡστόσο, πού ἐπέδρασε θετικά στόν Ἀϊνστάιν, δέν εἶναι ὁ θετικισμός, ἀλλά ἡ κριτική σκέψη τοῦ Mach. Γιατί ὁ Ἀϊνστάιν, «ὅπως πρακτικά ὅλοι οί ἐπιστήμονες, δεχόταν τήν ὑπαρξη ἑνός ἐξωτερικοῦ, ἀντικειμενικοῦ κόσμου» (Margenau), δηλαδή δεχόταν γιά τήν ἐπιστήμη τό ρεαλιστικό ἀξίωμα, καί διατύπωσε σέ πολλές εὐκαιρίες αὐτή του τήν ἄποψη.<sup>21</sup>

### 3.3. Ὁ χῶρος καί ὁ χρόνος στήν εἰδική θεωρία τῆς σχετικότητας

Μέ τή σχετικότητα φάνηκε ὁ ἀφύσικος χαρακτήρας τοῦ ἐννοιολογικοῦ πυρήνα τῆς κλασικῆς μηχανικῆς. Ὡστόσο ἡ κλασική μηχανική ἀνταποκρινόταν καί ἀνταποκρίνεται ἱκανοποιητικά σέ μιά τεράστια ποικιλία φαινομένων. Γιατί σά θεωρία προπαντός τοῦ μακρόκοσμου, ἰσχύει ἱκανοποιητικά γιά μακροσκοπικά συστήματα, ἢ ἐκεῖ ὅπου ἡ ἀκρίβεια τῶν μέσων πειραματικοῦ ἐλέγχου δέν εἶναι ἐξαιρετικά λεπτή.

Ἡ ἀνεπάρκεια τῆς κλασικῆς ἀντίληψης ἀποκαλύφθηκε μέ τή μελέτη βασικά μικροσκοπικῶν φαινομένων, ὅπως εἶναι τά φαινόμενα τῆς ὀπτικῆς καί τοῦ ἠλεκτρισμοῦ. Ἡ σχετικότητα ὑπῆρξε ὁ καρπός τῶν ἐξισώσεων τοῦ Maxwell καί τῆς ἀνάπτυξης τῆς ὀπτικῆς. Ταυτόχρονα χρειάστηκε νά διαμορφωθεῖ μιά λεπτή τεχνική πειραματισμοῦ, πού θά μπορούσε νά ἀποκαλύψει μηδαμινές διαφορές ἀνάμεσα στά φυσικά φαινόμενα. Τό συμβολόμετρο τῶν Michelson - Morley μπορεῖ νά θεωρηθεῖ σύμβολο μιᾶς νέας πειραματικῆς μικροτεχνικῆς πού ὀδηγεῖ σέ μιά νέα ἀντίληψη γιά τή φύση.

19. E. Mach. *La Mécanique*, Herman, Paris 1904.

20. Βλ. αὐτοβιογραφικές σημειώσεις τοῦ Einstein, στό *Albert Einstein, Philosopher - Scientist*. The Library of Living Philosophers, N. Y. 1951.

21. H. Margenau, στήν ἴδια συλλογή, καθώς καί τό ἄρθρο τοῦ Einstein στό *Physikalische Zeitschrift*, XVII 103.

Μέ τήν ειδική θεωρία τῆς σχετικότητας, ὁ Ἄϊνστάϊν θέλησε νά δώσει στους νόμους τῆς ἠλεκτροδυναμικῆς μορφή ἀνεξάρτητη ἀπό τό σύστημα ἀναφορᾶς. «Εἶναι γνωστό, γράφει, ὅτι ἡ ἠλεκτροδυναμική τοῦ Maxwell - ὅπως συνήθως κατανοεῖται σήμερα - ὅταν ἐφαρμόζεται σέ κινούμενα σώματα, ὀδηγεῖ σέ ἀσυμμετρίες πού δέν φαίνεται νά εἶναι σύμφυτες στά φαινόμενα. Παραδείγματα αὐτοῦ τοῦ εἴδους, συνεχίζει ὁ Ἄϊνστάϊν, μαζί μέ τίς ἀνεπιτυχεῖς ἀπόπειρες νά ἀνακαλυφθεῖ κάποια κίνηση τῆς γῆς σχετικά μέ τό «ἐλαφρό μέσον» (σημ.: τόν αἰθέρα, E.M.), ὑποβάλλουν [τήν ἄποψη] ὅτι τά φαινόμενα τῆς ἠλεκτροδυναμικῆς, ὅπως καί τῆς μηχανικῆς, δέν ἔχουν ιδιότητες πού νά ἀντιστοιχοῦν στήν ἰδέα τῆς ἀπόλυτης ἠρεμίας. Ὑποβάλλουν μᾶλλον τήν ἄποψη [...] ὅτι οἱ ἴδιοι νόμοι τῆς ἠλεκτροδυναμικῆς καί τῆς ὀπτικῆς θά ἰσχύουν σ' ὅλα τά συστήματα ἀναφορᾶς, γιά τά ὁποῖα ἰσχύουν οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς».<sup>22</sup>

Τήν ὑπόθεση αὐτή τήν ὀνόμασε ὁ Ἄϊνστάϊν Ἄρχή τῆς Σχετικότητας. Εἰσήγαγε ἐπίσης ἕνα ἄλλο ἀξίωμα, φαινομενικά μόνο ἀσύμβατο μέ τό προηγούμενο, δηλαδή τό ἀξίωμα τῆς σταθερότητας τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός, σέ ὅλα τά ἀδρανειακά συστήματα. Μέ τά δύο αὐτά ἀξιώματα οἰκοδόμησε «μιά θεωρία τῆς ἠλεκτροδυναμικῆς τῶν κινούμενων σωμάτων, ἀπλή καί μέ ἐσωτερική συνοχή», πού ἔκανε περιττή τήν εἰσαγωγή τοῦ αἰθέρα καί τοῦ ἀπόλυτου χώρου.

Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας γεννήθηκε συνεπῶς ἀπό τή μελέτη μιᾶς φυσικῆς ἀλληλεπίδρασης: τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς. Σκοπός της ἦταν νά διατυπώσῃ τους νόμους τοῦ ἠλεκτρομαγνητισμοῦ μέ τέτοιο τρόπο, ὥστε νά διατηροῦν τήν ἴδια μορφή σέ ὅλα τά ἀδρανειακά συστήματα. Ἡ ἀρχή λοιπόν τοῦ Ἄϊνστάϊν εἶναι μιά ἐπέκταση τῆς ἀρχῆς τῆς σχετικότητας τοῦ Γαλιλαίου. Εἶναι συνεπῶς μιά διευρυμένη ἀρχή ἀμεταβλητότητας τῆς μορφῆς, δηλαδή μὴ σχετικότητας.

Οἱ ἀσυμμετρίες στίς ὁποῖες ἀναφέρεται ὁ Ἄϊνστάϊν ὀφείλονται στό γεγονός ὅτι οἱ νόμοι τοῦ ἠλεκτρομαγνητισμοῦ, ὅπως ἐκφράζονται ἀπό τίς ἐξισώσεις τοῦ Maxwell, δέν διατηροῦν τήν ἴδια μορφή ὅταν ὑφίστανται ἕνα μετασχηματισμό σύμφωνα μέ τήν ὁμάδα τοῦ Γαλιλαίου. Οἱ μετασχηματισμοί σύμφωνα μέ τήν ὁμάδα Lorentz, ἀντίθετα, ἀφήνουν ἀμετάβλητη τή μορφή αὐτῶν τῶν ἐξισώσεων.

Οἱ μετασχηματισμοί τοῦ Γαλιλαίου προϋποθέτουν τήν ὕπαρξη τοῦ ἀπόλυτου χώρου καί ἐνός χρόνου παγκόσμιου. Οἱ νέοι μετασχηματισμοί, ἀντίθετα, ὀδηγοῦν στή σχετικότητα τοῦ χώρου καί τοῦ χρόνου (βλ. Πίνακα I). Θά ἐξετάσουμε λοιπόν τώρα, αὐτή τήν πλευρά τοῦ προβλήματος.

Κατά τόν Ἄϊνστάϊν: «Ἡ καθολική ἀρχή τῆς ειδικῆς θεωρίας τῆς

22. Βλ. Einstein and al., The Principle of Relativity, Dover Publ.



σχετικότητας περιέχεται στο άξιωμα: Οί νόμοι τής φυσικής είναι άμετάβλητοι σε σχέση με τούς μετασχηματισμούς Lorentz». <sup>23</sup>

Η συνέπεια όμως τής σχετικότητας, πού κυρίως τονίζεται, τόσο από φυσικούς όσο και από φιλοσόφους, είναι ή *σχετικότητα* του χώρου και του χρόνου, δηλ. ή εξάρτησή τους από τό σύστημα αναφοράς (συνήθως λέγεται: από τόν παρατηρητή). Πραγματικά, ένα μήκος πού ήρεμεί ως πρός τό σύστημα S, «συστέλλεται» τόσο περισσότερο, όσο πιά μεγάλη είναι ή ταχύτητα του σε σχέση με τό σύστημα S', και ό ρυθμός ενός ρολογιού γίνεται τόσο πιά βραδύς, όσο πιά μεγάλη είναι ή ταχύτητα του S ως πρός τό S'. Αντίστοιχα ή μάζα δέν είναι μέγεθος άμετάβλητο: άποδείχτηκε συνάρτηση τής ταχύτητας

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \text{όπου } m_0 \text{ είναι ή μάζα ήρεμίας του σώματος.}$$

### Πίνακας I

Μετασχηματισμοί για τό πέρασμα από ένα άδρανειακό σύστημα σε άλλο

Μετασχηματισμοί Γαλιλαίου	Μετασχηματισμοί Lorentz
$x' = x - vt$ $\psi' = \psi$ $z' = z$ $t' = t$	$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ $y' = y$ $z' = z$ $t' = \frac{t - \frac{\beta}{c} x}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \beta = \frac{v}{c}$
<p>Σημείωση: Οί παραπάνω μετασχηματισμοί εκφράζουν τόν απόλυτο χαρακτήρα του χώρου και τήν ύπαρξη ενός παγκόσμιου χρόνου. Προϋποθέτουν ταχύτητα άλληλεπιδράσεων: <math>v = \infty</math></p>	<p>Σημείωση: Οί παραπάνω μετασχηματισμοί εκφράζουν τήν εξάρτηση του μήκους και του χρονικού διαστήματος από τή σχετική κίνηση των δύο συστημάτων. Προϋποθέτουν πεπερασμένη ταχύτητα άλληλεπιδράσεων: <math>v = c</math></p>

23. Αύτοβιογρ. σημειώσεις, στο έργο, άρ. 19.

Τά παλαιά απόλυτα μεγέθη τῆς φυσικῆς: μῆκος, χρόνος, μάζα, δύναμη, ἐνέργεια, φορτίο, ρεῦμα, κλπ., ἀποδείχτηκαν σχετικά. Ἄλλά καθώς θά προσπαθήσουμε νά δείξουμε, ἡ σχετικότητα δέν ὀδηγεῖ σέ κανενός εἶδους σχετικισμό.

Πράγματι, τό παλαιό χωροχρονικό πλαίσιο δέν εἶναι κατάλληλο γιά τήν περιγραφή τῶν ρελατιβιστικῶν φαινομένων. Τό νέο πλαίσιο, ὅπως διατυπώθηκε ἀπό τόν Minkowski (1908)<sup>24</sup> ἀποτελεῖ ἕνα εἶδος σύνθεσης τῶν χωρικῶν καί τῆς χρονικῆς συντεταγμένης: ἕνα τετραδιάστατο σύμπαν, μέ τρεῖς χωρικές καί μιά χρονική διάσταση.<sup>25</sup>

Τό μῆκος δέν εἶναι μέγεθος ἀμετάβλητο, τό ἴδιο ὅπως καί ὁ χρόνος. Ὡστόσο ἡ «ἀπόσταση», δηλαδή τό χωροχρονικό διάστημα πού συνδέεται μέ τή μετρική τοῦ νέου σύμπαντος, εἶναι μέγεθος ἀνεξάρτητο ἀπό τό σύστημα ἀναφορᾶς.<sup>26</sup>

Ἡ νέα, ψευδοευκλείδια μετρική, σέ ἀντίθεση μέ τήν εὐκλείδια, προβλέπει διαστήματα θετικά ἢ χρονικοῦ τύπου ( $ds^2 > 0$ ), ἢ ἰσότροπα ( $ds^2 = 0$ ) καί ἀρνητικά ἢ χωρικοῦ τύπου ( $ds^2 < 0$ ). Ἐτσι, ἐνῶ γιά τήν εὐκλείδια γεωμετρία ἡ ἀπόσταση  $d(A,B) = 0$  ἂν  $A \neq B$ , ἐδῶ μπορούμε νά ἔχουμε  $d(A,B) = 0$  ἔστω κι ἂν  $A \neq B$ . Ὁ χαρακτήρας τῶν χωροχρονικῶν διανυσμάτων (χρονικοῦ, χωρικοῦ τύπου, ἢ ἰσοτρόπων) εἶναι ἀπόλυτος: ἀνεξάρτητος ἀπό τό διάστημα ἀναφορᾶς.

Ἄλλά τό χωροχρονικό διάστημα δέν εἶναι τό μόνο ἀπόλυτο μέγεθος στό νέο, ρελατιβιστικό πλαίσιο. Τά καθαυτό ρελατιβιστικά μεγέθη ὀρίστηκαν ἔτσι, ὥστε νά εἶναι ἀνεξάρτητα ἀπό τό σύστημα ἀναφορᾶς στό τετραδιάστατο σύμπαν. Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας, ὑπερβαίνοντας τή σχετικότητα τῶν κλασικῶν μεγεθῶν, δημιούργησε, μέ κατάλληλες συνθέσεις, νέα μεγέθη πού ἔχουν ἀπόλυτο χαρακτήρα, μέ τήν ἔννοια ὅτι δέν ἐξαρτῶνται ἀπό τό σύστημα ἀναφορᾶς. Στόν Πίνακα II σημειώνουμε τά κυριότερα ἀπό τά νέα, ρελατιβιστικά μεγέθη (βλ. σελ. 66)

24. Βλ. H. Minkowski, Space and Time, στό: The Principle of Relativity, Dover Publ.

25. Ἡ μετρική τοῦ νέου χώρου δέν εἶναι εὐκλείδεια. Πρόκειται γιά μιά ψευδοευκλείδια μετρική, πού ἐκφράζεται ἀπό τό θεμελιώδη μετρικό τανυστή:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix} .$$

Ἡ θετική μονάδα ἀντιστοιχεῖ στή συνιστώσα τοῦ χρόνου καί οἱ τρεῖς ἀρνητικές στίς τρεῖς συνιστώσες τοῦ χώρου. Ὁ νέος «χώρος» ἀποτελεῖται συνεπῶς ἀπό δύο «ὑποχώρους»: τόν τρισδιάστατο χώρο καί τό μονοδιάστατο χρόνο, σέ ἀδιάρρηκτη ἐνότητα. «Μόνο ἕνα εἶδος ἐνότητας τῶν δύο», ἔγραφε ὁ Minkowski, «διατηρεῖ μιά ἀνεξάρτητη πραγματικότητα».

26. Πράγματι ἔχουμε:  $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = ds'^2$

Συνεπώς *σχετικότητα* δέ σημαίνει εξάρτηση μεγεθῶν καί νόμων ἀπό τό σύστημα ἀναφορᾶς. Τό ἀντίθετο: τά καθ'αυτό ρελατιβιστικά μεγέθη (τετραδιανύσματα καί τανυστές) εἶναι ἀνεξάρτητα ἀπό τό σύστημα ἀναφορᾶς. Ἡ *σχετικότητα* τῶν τρισδιάστατων κλασικῶν μεγεθῶν ξεπερνιέται στό τετραδιάστατο πλαίσιο.

Τά νέα, ἀμετάβλητα, φυσικά μεγέθη βρίσκουν τό φυσικό τους πλαίσιο ὄχι πιά στό χῶρο τοῦ Εὐκλείδη, ἀλλά στό νέο χωροχρονικό συνεχές: στό σύμπαν τοῦ Μίνκωσκι.

Βέβαια καί ἡ κλασική φυσική περιέγραφε τά γεγονότα στό χῶρο καί στό χρόνο. Ἀλλά, καθὼς γράφει ὁ Ἀϊνστάιν, στό τετραδιάστατο συνεχές τῆς κλασικῆς φυσικῆς, ὁ ὑποχῶρος μέ σταθερή τιμή χρόνου ἔχει

## Πίνακας II

### Ἀντιστοιχία κλασικῶν καί ρελατιβιστικῶν μεγεθῶν

Σχετικά μεγέθη στό χωρόχρονο	Ἀπόλυτα μεγέθη στό χωρόχρονο
Διάστημα } Χρόνος } $\implies$	Χωροχρονικό διάστημα
Μάζα } Ἐνέργεια } $\implies$	Τετραδιάνυσμα ὀρμῆς-ἐνέργειας
Ἡλεκτρικό φορτίο } Ἡλεκτρικό ρεῦμα } $\implies$	Τετραδιάνυσμα ρεύματος
Ἡλεκτρικό πεδίο } Μαγνητικό πεδίο } $\implies$	Τανυστής ἠλεκτρομαγνητικοῦ πεδίου
Τρισδιάστατη δύναμη $\implies$	Τετραδιάνυσμα δύναμης
Τρισδιάστατη ταχύτητα $\implies$	Τετραδιάνυσμα συμπαντικῆς ταχύτητας

ἀπόλυτη πραγματικότητα, ἀνεξάρτητη ἀπό τό σύστημα ἀναφορᾶς. Ἔτσι τό τετραδιάστατο συνεχές χωρίζεται σέ τρισδιάστατο χῶρο καί σέ μονοδιάστατο χρόνο. Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας, ἀντίθετα, δημιουργεῖ μιά τυπική ἐνότητα τῶν χωρικῶν συντεταγμένων καί τοῦ χρόνου, ἡ ὁποία ἐκφράζεται στούς νόμους τῆς φυσικῆς. Ἡ ἀμεταβλητότητα κατά τούς μετασχηματισμούς τοῦ Lorentz, ἐκφράζει - καί προϋποθέτει - αὐτήν τήν



ένότητα. Τά παλαιά τρισδιάστατα διανυσματικά μεγέθη αντικαθίστανται στο νέο πλαίσιο από τανυστικά τετραδιάστατα μεγέθη, πού εξασφαλίζουν τήν άμεταβλητότητα τών φυσικῶν νόμων.

Ἄλλά πῶς καθορίζεται ὁ χαρακτήρας τοῦ σύμπαντος τῆς εἰδικῆς σχετικότητας, δηλαδή τοῦ σύμπαντος τοῦ Minkowski; Καθώς ἔχουμε τονίσει, καί ἐδῶ τόν καθοριστικό ρόλο τόν παίζει ἡ ἠλεκτρομαγνητική ἀλληλεπίδραση, πού καθορίζει τίς τρεῖς διαφορετικές περιοχές τοῦ σύμπαντος.

Ὁ τόπος διάδοσης τών ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων πού ἐκπέμπονται ἀπό τό σημεῖο 0, εἶναι ἕνας κῶνος μέ γωνία κορυφῆς  $90^\circ$ , ὁ λεγόμενος *χαρακτηριστικός κῶνος*. Στήν ἐπιφάνεια τοῦ κῶνου (χαρακτηριστική ἐπιφάνεια) τά διαστήματα ἔχουν μηδενικό μήκος ( $ds^2 = 0$ ).

Τό ἐσωτερικό τοῦ κῶνου ἀποτελεῖ τό ἀπόλυτο μέλλον. Ἐδῶ τά διαστήματα εἶναι θετικά (χρονικοῦ τύπου,  $ds^2 > 0$ ). Στήν περιοχή αὐτή τό πρῖν καί τό ὕστερα ἔχουν ἀπόλυτο χαρακτήρα. Ἔτσι, δύο γεγονότα, πού χωρίζονται ἀπό ἕνα διάστημα χρονικοῦ τύπου, μποροῦν νά συμπέσουν στό χῶρο μέ κατάλληλη στροφή τοῦ συστήματος συντεταγμένων, ἀλλά ἡ χρονική τους σχέση δέν μπορεῖ νά ἀντιστραφεῖ. Ἡ αἰτιακή σχέση καί, γενικότερα, οἱ μή ἀντιστρεπτές διαδικασίες ἔχουν λοιπόν καθορισμένη χρονική τάξη: πορεύονται πρὸς τήν κατεύθυνση τοῦ βέλους τοῦ χρόνου, ἀπό τό παρελθόν πρὸς τό μέλλον. Ἐνας κῶνος μέ κοινή κορυφή καί ἴση γωνία κορυφῆς μέ τόν προηγούμενο, ἀλλά μέ ἀντίστροφη τοποθέτηση, ἀποτελεῖ τόν κῶνο τοῦ *ἀπόλυτου παρελθόντος*.

Ἐξω ἀπό τόν κῶνο τοῦ φωτός ὑπάρχουν τά διαστήματα χωρικοῦ τύπου ( $ds^2 < 0$ ). Ἡ περιοχή αὐτή εἶναι ὁ τόπος τοῦ ἀπόλυτου διαχωρισμοῦ: Δύο γεγονότα πού συνδέονται μέ διάστημα χωρικοῦ τύπου, μποροῦν μέ κατάλληλο μετασχηματισμό νά συμπέσουν χρονικά, ἀλλά ἡ χωρική τους ἀπόσταση δέν μπορεῖ νά μηδενιστεῖ. Τέτοια γεγονότα δέν μποροῦν νά συνδέονται μέ αἰτιακή σχέση.

Τά σωμάτια μέ θετική μάζα κινοῦνται στό ἐσωτερικό τοῦ κῶνου τών ἠλεκτρομαγνητικῶν ἀκτινοβολιῶν. Ἐνα τέτοιο σωματίο κινεῖται πάνω σέ *μιά κοσμική γραμμή*. Τά διαστήματα σ' αὐτή τήν περιοχή (διαστήματα χρονικοῦ τύπου) ἐκφράζουν - μαζί μέ τά ἄλλα - τή δυνατότητα γιά αἰτιακές συσχετίσεις. Ὀριακά, ὅταν ἡ μάζα τείνει στό 0, προσεγγίζουμε τόν κῶνο τοῦ φωτός.

Ἡ ταχύτητα λοιπόν τών ἠλεκτρομαγνητικῶν ἀλληλεπιδράσεων συνιστᾷ *μιά ὀριακή ταχύτητα*, τήν ὁποία δέν μπορεῖ νά ἀποκτήσει ἕνα σωματίο μέ μάζα ἡρεμίας μή μηδενική. Ἄν συνεπῶς ἡ μάζα ἡρεμίας τών φωτονίων εἶναι ἐλαφρῶς ἀνώτερη ἀπό τό 0, τότε ὁ χαρακτηριστικός κῶνος εἶναι ἕνας τόπος πού δέν ἀντιστοιχεῖ σέ καμιά πραγματική

κίνηση. Επιπλέον, ή όριακή ταχύτητα ( $v = c$ ) θέτει δύο άλλα θεμελιώδη προβλήματα: 1) Τί σημαίνει ότι ή μάζα ενός σώματος τείνει στο άπειρο όταν ή  $v \rightarrow c$ ; και 2) Είναι πραγματικά αδύνατο νά υπάρχουν στή φύση αλληλεπιδράσεις μέ ταχύτητα  $c' > c$ ;

Η μετάδοση τών ήλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων (κυμάτων) περιγράφεται από μία διαφορική εξίσωση δευτέρου βαθμού, όπου φυσικά υπεισέρχεται ή σταθερά  $c$ :

$$\Delta \phi / c^2 - (\partial w / \partial t)^2 - (\text{grad } w)^2 = 0.$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί νά αποκτήσει γενικότερη σημασία. Μπορεί νά εκφράσει κάθε κυματική διαταραχή μέ περασμένη ταχύτητα, ή όποια μεταφέρει κάποιο «σήμα»<sup>27</sup>. Τά κύματα βαρύτητας περιγράφονται, καθώς θά δούμε, από μία όμοια εξίσωση και ή ταχύτητά τους προβλέπεται ίση μέ τήν ταχύτητα τών ήλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Η είδική θεωρία τής σχετικότητας περιγράφει μία κατηγορία φαινομένων, μέ τρόπο ανεξάρτητο από τό σύστημα αναφοράς. Είναι λοιπόν μία θεωρία γενικότερης μή σχετικότητας, συγκρινόμενη μέ τήν κλασική μηχανική. Καθώς γράφει ό H. Reichenbach, «οί φιλόσοφοι, πού θεωρούν σάν άκρα σοφία ότι τό καθετί είναι σχετικό, πλανώνται πιστεύοντας ότι ή θεωρία του Αϊνστάιν προσφέρει μαρτυρίες για μία τέτοια σαρωτική γενίκευση». Ακόμα, συνεχίζει ό Reichenbach, ή αναφορά στους διάφορους παρατηρητές «όδήγησε στή λαθεμένη αντίληψη ότι ή σχετικότητα τών χωροχρονικών μετρήσεων συνδέεται μέ τήν ύποκειμενικότητα του παρατηρητή»<sup>28</sup>. Σήμερα, όπου οί ρελατιβιστικοί ύπολογισμοί έχουν γίνει καθημερινή πρακτική στή φυσική τών μικροσωματίων, στήν αστροφυσική, στήν κοσμολογία, και άλλου, οί ύποκειμενικές αυτές παρερμηνείες βρίσκουν όλο και λιγότερο πρόσφορο έδαφος.

Πρίν κλείσουμε αυτή τήν παράγραφο, θά σημειώσουμε τήν ακόλουθη παρατήρηση: Καθώς γράφει ό H.M. Schwartz, «συνήθως λέγεται ότι μέ τή θεωρία τής σχετικότητας οί νόμοι τής φυσικής γίνονται ανεξάρτητοι από τό ένα ή τό άλλο από τά δύο συστήματα συντεταγμένων πού βρίσκονται σέ όμοιόμορφη εθύγραμμη σχετική κίνηση. Αλλά όταν δέν διατυπώνεται μέ σαφήνεια ότι ένα σύστημα αναφοράς είναι αδρανειακό, τότε ή διατύπωση στερείται βεβαίως ακριβείας»<sup>29</sup>.

Είναι γνωστό ότι αν ένα σύστημα είναι αδρανειακό, τότε όλα τά

27. Βλ. V. Fock, *The Theory of space, time and Gravitation*, Pergamon Press, σελ. 17 - 18.

28. *The philosophical significance of the Theory of Relativity*, στό A. Einstein, *Philosopher - Scientist*, σελ. 17 - 18.

29. *American Journal of Physics*, 45, 18 (1977).

συστήματα πού κινούνται εὐθύγραμμα καί ὁμαλά ὡς πρὸς αὐτό, εἶναι ἐπίσης ἀδρανειακά καί ἡ εἰδική θεωρία τῆς σχετικότητας προϋποθέτει τέτοια συστήματα. Ἡ κλασικὴ μηχανικὴ ἔλπιζε νά ἀνακαλύψει τὸν ἀπόλυτο χῶρο, γιὰ νά βρεῖ τὸ κατεξοχὴν ἀδρανειακὸ σύστημα, ὡς πρὸς τὸ ὁποῖο θά ὄριζε τὰ ὑπόλοιπα. Ἡ εἰδική θεωρία τῆς σχετικότητας ἀπόρριψε τὴν ἔννοια τοῦ ἀπόλυτου χώρου. Πῶς ὅμως μπορεῖ νά ἐξακριβώσει πειραματικά τὴν ὕπαρξη ἑνὸς συστήματος ἀδράνειας; Ἡ πρόταση τοῦ Ἀϊνστάιν: οἱ νόμοι τῆς φυσικῆς εἶναι ἴδιοι γιὰ ὅλα τὰ συστήματα ἀδράνειας, προϋποθέτει προφανῶς τὴν πρόταση: συστήματα ἀδράνειας εἶναι τὰ συστήματα ἀναφορᾶς στὰ ὁποῖα ἰσχύουν οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς (ἢ γενικότερα τῆς φυσικῆς). Ἀλλά δέν πρόκειται τότε γιὰ φαῦλο κύκλο; Καί ἡ ἀναζήτηση τῆς ἀπόλυτης κίνησης δέν ἦταν ἀκριβῶς ἡ ἀγωνιώδης προσπάθεια τῶν φυσικῶν νά βγοῦν ἀπ' αὐτὸν τὸν κύκλο;

### 3.4. Βαρύτητα, χῶρος καί χρόνος

Τὸ σύμπαν τῆς εἰδικῆς θεωρίας παρουσιάζει δύο βασικὲς ἰδιομορφί-ες: Πρῶτο, περιορίζει τὴν ἀμεταβλητότητα τῶν φυσικῶν νόμων μόνο στὰ ἀδρανειακά συστήματα. Δεύτερο, εἶναι ἓνα σύμπαν μέ σταθερὴ μετρικὴ, γιατί ἡ μετρικὴ αὐτὴ δέν λαβαίνει ὑπόψη τὴν κατανομὴ τῆς ὕλης στό χωρόχρονο. Τόσο ὁ πρῶτος περιορισμὸς ὅσο καί ἡ δευτέρη ἐξιδανίκευση ξεπεράστηκαν ἀπὸ τὴ γενικὴ θεωρία τῆς σχετικότητας, πού τυπικά εἶναι ἡ θεωρία τῆς γενικῆς ἀμεταβλητότητας. Ὡς πρὸς τὸ φυσικὸ της περιεχόμενο, ἡ γενικὴ θεωρία εἶναι μιά νέα θεωρία τῆς βαρύτητας, καί μπορεῖ νά ὀριστεῖ σάν ἡ θεωρία τῶν σχέσεων χώρου, χρόνου καί ὕλης.

Ἡ εἰδικὴ θεωρία τῆς σχετικότητας γεννήθηκε ἀπὸ τὴ σύγκρουση τῶν μηχανιστικῶν ἀντιλήψεων μέ τὴν ἠλεκτρομαγνητικὴ πραγματικό-τητα. Ἡ ἀσυμβατότητα τοῦ κλασικοῦ νόμου τοῦ Νεύτωνα μέ μιά σειρά ἀστρονομικὰ δεδομένα, ὑπῆρξε ἀντίστοιχα μιά ἀπὸ τίς αἰτίες πού ὀδήγησαν στὴ γενικὴ θεωρία τῆς σχετικότητας.

Τὸ πρόγραμμα τοῦ Ἀϊνστάιν ἦταν νά ξεπεράσει τοὺς περιορισμοὺς τῆς εἰδικῆς θεωρίας, καί νά διατυπώσει τοὺς νόμους τῆς φυσικῆς ἔτσι ὥστε νά εἶναι ἀμετάβλητοι ὡς πρὸς ὁποιοδήποτε σύστημα ἀναφορᾶς, ἀδρανειακὸ ἢ μὴ. «Οἱ νόμοι τῆς φυσικῆς, ἔγραφε τὸ 1916, πρέπει νά εἶναι τέτοιοι ὥστε νά ἐφαρμόζονται σὲ συστήματα ἀναφορᾶς μέ ὁποιαδήποτε μορφή κίνησης. Πρὸς αὐτὴ τὴν κατεύθυνση φτάσαμε σὲ μιά ἐπέκταση τῆς ἀρχῆς τῆς σχετικότητας».<sup>30</sup>

30. A. Einstein in: *The Principle of Relativity*, Dover, σελ. 113