

Από τον Χώρο και Χρόνο στον Χωρόχρονο: Φιλοσοφικές Συνέπειες της Θεωρίας της Σχετικότητας

1. Εισαγωγή

Η διερεύνηση των εννοιών του χώρου και του χρόνου κέντρισε την ανθρώπινη σκέψη κατά τη σύνολη διάρκεια της πορείας της. Ο Αριστοτέλης ήδη διατυπώνει το φιλοσοφικό ερώτημα για τον χώρο με περισσή καθαρότητα: «Αν ο χώρος είναι ή δεν είναι, και πώς είναι και τι είναι» [... περί τόπου ὥσπερ και περί ατείου γνωρίζειν, εἰ ἐστὶν ἢ μὴ, και πως ἐστὶ, και τι ἐστὶν (Φυσικά Δ1, 208α 27-28)]. Η συστηματική ανάλυση του προβλήματος περί χώρου και χρόνου διαπλέκεται αναπόφευκτα με το γενικότερο πρόβλημα της αντιστοιχίας Λόγου και Φύσης. Τα ερωτήματα που προκύπτουν –επιστημονικής, γνωσιοθεωρητικής όπως και οντολογικής υφής– είναι πολλαπλά: Ο χώρος και ο χρόνος αποτελούν αιτιώδεις, αυτόνομες οντότητες, ή μπορούν να εληφθούν μόνο ως ένα σύνολο διατάξεων, ως ένα σύστημα σχέσεων ανάμεσα στα υλικά αντικείμενα; Είναι ο χώρος και ο χρόνος υποκειμενικές κατηγορίες, παράγωγα του ανθρώπινου πνεύματος που χρησιμεύουν απλώς για την ταξινόμηση και διάταξη των γεγονότων, ή αποτελούν κατηγορίες του όντος, εξαιρουμένων μορφών του υπαρκτού; Είναι ο χώρος και ο χρόνος αντικειμενικά χαρακτηριστικά της φυσικής πραγματικότητας ικανά να διαπιστωθούν ή να προσεγγιστούν μέσω της αισθητηριακής εμπειρίας, της παρατήρησης και του πειράματος, ή αποτελούν προεμπειρικούς (a priori) τύπους της νόησης και της αίσθησης που επιβάλλονται επί της εμπειρίας για την οργάνωση και κατανόησή της, όπως προσβείναι, για παράδειγμα, η καντιανή αντίληψη; Ακόμη, έχει ο χρόνος αρχή και τέλος; Προηγείται ο χρόνος της ύπαρξης ή δημιουργήθηκε ταυτόχρονα με την ύλη; Ποιες οι πιθανές σχέσεις αλληλεξάρτησης χώρου και χρόνου; Πώς συνδέονται ο χώρος και ο χρόνος με την κίνηση και την ύλη; Τα ερωτήματα αυτά εξακολουθούν να απασχολούν τη φιλοσοφική σκέψη καθώς και τη σύγχρονη φυσική επιστήμη, ιδιαίτερα στην προσπάθεια ανάπτυξης ενός κατάλληλου θεωρητικού σχήματος που στοχεύει στην ενοποίηση των θεμελιωδών δυνάμεων της φυσικής.

2. Η νευτώνεια-απόλυτη αντίληψη περί χώρου και χρόνου

Έως την αρχή του 20ού αιώνα, το οικοδόμημα της νεότερης φυσικής στηρίχτηκε στο μνημειώδες έργο του Ισαάκ Νεύτωνα *Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας* (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 1687/1934) θέτοντας τους θεμελιώδεις νόμους για την κίνηση των υλικών σωμάτων συμπεριλαμβανομένου του νόμου της παγκόσμιας βαρύτητας. Εντούτοις, η γενικότερη μηχανιστική αντίληψη για τη φύση την εποχή του Νεύτωνα ενίσχυσε τη συμμετοχή του θεοκρατικού διαλογισμού στην επιστήμη και προσέδωσε ένα μεταφυσικό, στατικό υπόβαθρο στις έννοιες του χώρου και του χρόνου. Ο Νεύτων ισχυρίστηκε, στη βάση θεολογικών και φυσικών επιχειρημάτων, ότι οι θεμελιώδεις νόμοι της μηχανικής καθορίζουν την κίνηση των σωμάτων εντός ενός *ακίνητου* και *καθολικού* πλαισίου, του απόλυτου χώρου και απόλυτου χρόνου. Θεώρησε την ύπαρξή τους ως *οντολογικά ανεξάρτητα* και *χρονικά πρότερη* της ύπαρξης της ύλης και των αλληλεπιδράσεών της. Γράφει συγκεκριμένα ο Νεύτων στο εισαγωγικό Scholium των *Principia* (1687/1934, σ. 8): «Εκτός από τον εμπειρικό χώρο και χρόνο, τους οποίους συναντάμε στις μελέτες της σχετικής κίνησης και οι οποίοι υπεισέρχονται στις σχέσεις που εκφράζουν την κίνηση αυτή, υπάρχουν ο απόλυτος χώρος και χρόνος. Είναι τα σταθερά στοιχεία στα οποία αναφέρεται η απόλυτη κίνηση και προϋποθέτει η αρχή της αδράνειας. Ο χώρος και ο χρόνος έχουν απόλυτη υπόσταση ανεξάρτητη από τα φαινόμενα που διαδραματίζονται εντός αυτών... Ο απόλυτος χώρος, από τη φύση του, άσχετα από οτιδήποτε εξωτερικό, παραμένει πάντα όμοιος και ακίνητος.... Ο απόλυτος, αληθής και μαθηματικός χρόνος, αφ' εαυτού και από τη φύση του, ρέει ομοιόμορφα, χωρίς να αναφέρεται σε οτιδήποτε το εξωτερικό». Και ο Νεύτων καταλήγει, «[ο απόλυτος χώρος και απόλυτος χρόνος] είναι τα όργανα με τα οποία ο Θεός πραγματοποιεί το πανταχού παρόν του στον κόσμο και συλλαμβάνει ακαριαία τη ροή των πραγμάτων».

Συνεπώς ο απόλυτος χώρος για τον Νεύτωνα είναι *ανεξάρτητος* της παρουσίας των υλικών σωμάτων, όπως ο απόλυτος χρόνος είναι ανεξάρτητος από τις διεργασίες μεταβολής στην κινητική κατάσταση των σωμάτων. Ο απόλυτος χώρος θεωρήθηκε άπειρος, ακίνητος και αιώνιος. Πάντοτε ο αυτός διαμέσου του «αληθινού» χρόνου, η ροή του οποίου δεν υπόκειται σε οποιαδήποτε μεταβολή: είναι κοινός για κάθε σύστημα αναφοράς, αδιακρίτως του είδους της κίνησης. Τα συμβάντα λαμβάνουν χώρα μέσα του, δίχως τίποτα να επηρεάζει τον ρυθμό του. Επιπλέον οι σχέσεις χώρου, χρόνου και ύλης είναι *εξωγενείς*. Δεν υπάρχει αλληλεξάρτηση ανάμεσά τους. Ο χώρος εκλαμβάνεται ως οιονεί παγκόσμιο «δοχείο» που περιέχει τα υλικά σώματα: η απεριόριστη σκηνή επί της οποίας εκτυλίσσονται τα φυσικά φαινόμενα. Ο χώρος είναι αδιάφορος στην παρουσία της ύλης, δεν επηρεάζεται από αυτή και προϋπάρχει αυτής.

Στην αντίληψη του Νεύτωνα ο χώρος και ο χρόνος κατέχουν αντικειμενική υπόσταση, όχι όμως οντολογική αυθυπαρξία: συνιστούν ιδιότητες ενός απόλυτου Υποκειμένου, του αισθητηρίου του Θεού («*sensorium Dei*»), του μέσου δηλαδή διά του οποίου όλοι οι τόποι και όλοι οι χρόνοι είναι ταυτοχρόνως παρόντες σε Αυτόν. Οι καταβολές αυτής της αντίληψης εντοπίζονται ανεπιφύλακτα στις θεολογικές πεποιθήσεις του Νεύτωνα. Περιοριζόμενοι ωστόσο στην ορθολογική συνιστώσα της κοσμοθεωρίας του, παρά τη θεοκρατική της θεμελίωση και μηχανιστική της ανάπτυξη –τυπικά χαρακτηριστικά εκείνης της περιόδου–,

ο Νεύτων είναι δυνατόν να χαρακτηριστεί ως προγονικός φορέας του κλασικού επιστημονικού ρεαλισμού. Η θέση ότι ο «ανώτατος Θεός ... συνιστά τη διάρκεια και τον χώρο» δεν διαδραμάτισε λειτουργικό ρόλο στην επιτυχή εφαρμογή της μηχανικής του, η οποία αποτέλεσε θεμέλιο της φυσικής επιστήμης επί δύο και πλέον αιώνες.

3. Πρώιμες σχεσιοκρατικές αντιλήψεις περί χώρου και χρόνου

Η νευτώνεια αντίληψη του απόλυτου συνάντησε την αυστηρή κριτική του πρωτεργάτη του θετικισμού, φυσικού-φιλοσόφου, Ερνστ Μαχ (Ernst Mach, 1838-1916). Ο Μαχ, επηρεασμένος από την εμπειριστική φιλοσοφία του Χιουμ (Hume, 1711-1776) και ιδιαίτερα από την ιδεαλιστική και συγχρόνως εμπειριστική κοσμοθεώρηση του Μπέρκλεϊ (Berkeley, 1685-1753), επιχείρησε να αναδιατυπώσει τη νευτώνεια μηχανική υπό το πρίσμα μιας ανστηρά φαινομεναλιστικής σκοπιάς. Στο έργο του *Επιστήμη της Μηχανικής* (1883/1960), που συμπλήρωσε τις δεκαέξι εκδόσεις έως τον θάνατό του το 1916, επιδίωξε μέσω αυτής της αναδιατύπωσης να αποδεσμεύσει τη θεωρία της μηχανικής από τις «μεταφυσικές» της προλήψεις. Ο Μαχ θεωρεί ότι οι έννοιες του απόλυτου χώρου, απόλυτου χρόνου και απόλυτης κίνησης στερούνται εμπειρικού περιεχομένου. Ισχυρίζεται ότι πρόκειται για έννοιες που δεν είναι αντιληπτές από τις αισθήσεις μας, ούτε αποδεδειγμένες από τη λογική μας: δεν έχουν επομένως, σύμφωνα με τον Μαχ, πρακτική ή επιστημονική αξία. Τα υλικά σώματα κινούνται στον χώρο και τον χρόνο σε σχέση με άλλα αντιζείμενα. Δεν υπάρχει νόημα στην απόλυτη κίνηση.

Η ανυπαρξία οποιασδήποτε φυσικής σημασίας της απόλυτης κίνησης, όπως και του απόλυτου χώρου και χρόνου, είχε ήδη υποστηριχτεί από τον Λάιμπνιτς (Leibniz, 1646-1716), σύγχρονο του Νεύωνα. Ο Λάιμπνιτς αντιλαμβάνεται τον χώρο και τον χρόνο όχι υποστασιοκρατικά, ως αιθυπαρχτες οντότητες, αλλά *σχεσιοκρατικά*, ως σύνολα χωρικών ή χρονικών σχέσεων μεταξύ υλικών σωμάτων ή γεγονότων. Στην αλληλογραφία του με τον Σάμουελ Κλαρκ (Samuel Clarke, 1717/1956, σ. 59), μαθητή και φίλο του Νεύωνα, επιχειρηματολογεί ότι, εάν η θέση του υλικού σύμπαντος, στον νευτώνειο απόλυτο χώρο, μεταβαλλόταν έτσι ώστε να εναλλάσσόταν η ανατολή με τη δύση, χωρίς όμως να τροποποιούνταν και οι *σχετικές* θέσεις των υλικών σωμάτων μεταξύ τους, τότε καμία διακρισίμη διαφορά δεν θα ήταν δυνατόν να παρατηρηθεί. Ο Λάιμπνιτς θεωρεί ότι μια τέτοια αλλαγή δεν θα οδηγούσε σε πραγματικές φυσικές συνέπειες με την έννοια ότι, όχι μόνο η άμεση εποπτεία, αλλά ούτε οι φυσικοί νόμοι της νευτώνειας μηχανικής θα ήταν σε θέση να βοηθήσουν στην επιλογή μεταξύ των δυνατών εναλλακτικών καταστάσεων. Ο ίδιος κατανοούσε ωστόσο ότι ο οπαδός της νευτώνειας υποστασιοκρατικής αντίληψης θα εξελάμβανε τον κόσμο που θα προέκυπτε ποιοτικά διαφορετικό, αφού τα σώματα που θα τον αποτελούσαν θα καταλάμβαναν διαφορετικές θέσεις στον απόλυτο χώρο του Νεύωνα.

Το μεταφυσικό, υποστασιοκρατικό υπόβαθρο της νευτώνειας αντίληψης αμφισβητήθηκε επίσης από τον επίσκοπο Μπέρκλεϊ, πνευματικό πρόδρομο του Μαχ, στο έργο του *Αρχές της Ανθρώπινης Γνώσης* (1710/1949). Ο ριζοσπαστικός ιδεαλισμός του Μπέρκλεϊ θεωρεί αδιανόητη μια φυσική πραγματικότητα μη αντιληπτή από τις αισθήσεις. Απορρίπτει

την ιδέα του απόλυτου χώρου και της απόλυτης κίνησης ως εικασία, «άχρηστο πλάσμα της φαντασίας», στερούμενη κάθε πειραματικής θεμελίωσης. Χαρακτηρίζει τη νεντώνεια έννοια του απόλυτου ως επιβλαβή και παράλογη, ακόμη και από θεολογική άποψη: ο χώρος, για τον Μπέρκλεϊ, μόνο ως σχετικός μπορεί να κατανοηθεί, «ή υπάρχει κάτι άλλο πέρα από το Θεό που είναι αιώνιο, αδημιούργητο, άπειρο, αδιαίρετο, αμετάβλητο» (1710/1949, σ. 94). Είχε τονίσει χαρακτηριστικά ότι ο χώρος στην απουσία της ύλης είναι ακατανόητος. Εάν δεν υπήρχαν υλικά σώματα στο σύμπαν, δεν θα υπήρχε νόημα να μιλούμε για τον χώρο: δεν θα ήταν δυνατός ο προσδιορισμός χωρικών διαστημάτων. Ο Μπέρκλεϊ ταιντίζει την κίνηση ενός σώματος με τη συνολική μεταβολή των σχέσεών του αναφορικά με άλλα σώματα. Η κίνηση, όπως ο χώρος και ο χρόνος, εκλαμβάνεται ως μια σχέση συνύπαρξης και διάταξης των σωμάτων μεταξύ τους. Εάν οραματιζόμασταν ένα μοναδικό υλικό σώμα σε ένα, κατά τα άλλα, κενό σύμπαν –πρότεινε ρητορικά ο Μπέρκλεϊ– θα ήταν αδύνατο να αποδώσουμε την οποιαδήποτε κίνηση, χρονική διάρκεια ή χωρική έκταση στο σώμα αυτό. Για τον Μπέρκλεϊ, όπως και για τον Μαχ, ο χώρος δεν είναι κάτι που υπάρχει εξωτερικά και ανεξάρτητα από τη νόηση και την αισθητηριακή εμπειρία.

Κατά την άποψη του Μαχ, η ιδέα ενός απόλυτου χώρου, ενός φορέα δηλαδή ο οποίος δρα επί των υλικών σωμάτων χωρίς να λειτουργεί και ως αποδέκτης της (αντι)δράσης των σωμάτων αυτών, αναιρεί δομικά στοιχεία της ίδιας της μηχανικής θεωρίας: προσβάλλει την καθολικότητα του νόμου της δράσης και αντίδρασης. Κατ' επέκταση η συνήθης επίκληση του Νεύτωνα στον απόλυτο χώρο ως ενεργές αίτιο για την πρόκληση της αδράνειας στην ευθύγραμμη κίνηση ή ως επεξηγηματικό μηχανισμό για την παραγωγή των φυγόκεντρων δυνάμεων στην περιστροφική κίνηση (όπως στο πείραμα του περιστρεφόμενου κάδου) οφείλει να απαλειφθεί από το σύστημα της μηχανικής.

Ο Μαχ προτείνει την αντικατάστασή του από το συμπανές φυσικό φόντο των απλανών αστέρων. Έτσι δεν θα αναφερόμαστε πλέον σε μια μαθηματική κατασκευή ή φιλοσοφική ιδέα. Ο ουράνιος θόλος των απλανών αστέρων είναι ένα φυσικό σύστημα, κατασκευασμένο από ύλη, η επίκληση του οποίου αρκεί να ακυρώσει κάθε μεταφυσική σύγχυση και να προσδώσει φυσική έννοια στους νόμους κίνησης του Νεύτωνα. Το σύστημα των απλανών αστέρων, οι οποίοι συναπαρτίζουν το σύνολο της απόμακρης ύλης του σύμπαντος, συνιστά ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς ως προς το οποίο θα πρέπει να περιγράφεται η κίνηση και να μετρώνται οι χωρικές αποστάσεις. Ο χώρος καθαυτός, για τον Μαχ, δεν υπάρχει, παρό μόνο ως ένα σύστημα σχέσεων μεταξύ υλικών σωμάτων.

Κατά τη θεώρηση του Μαχ, η απόμακρη ύλη του σύμπαντος, και όχι ο νεντώνειος απόλυτος χώρος, είναι επίσης υπεύθυνη για την πρόκληση των αδρανειακών φαινομένων. Οι αδρανειακές δυνάμεις, για παράδειγμα φυγόκεντρες δυνάμεις, που αναπτύσσονται σε ένα υλικό σώμα εξαιτίας της επιταχυνόμενης ή περιστροφικής του κίνησης, δεν αποτελούν συνέπεια της κίνησης του σώματος ως προς τον απόλυτο χώρο, όπως ο Νεύτων διατεινόταν, αλλά απόρροια της αλληλεπίδρασης και σχετικής κίνησης του σώματος ως προς την ολική κατανομή της ύλης στο σύμπαν. Όπως τα υλικά σώματα υπόκεινται στη δράση βαρυτικών δυνάμεων, συναρτήσει των μαζών και των μεταξύ τους αποστάσεων, ομοίως τα υλικά σώματα υπόκεινται, κατά τον Μαχ, στη δράση αδρανειακών δυνάμεων. Το μέγεθος και η κατεύθυνση της ασκούμενης αδρανειακής δύναμης αναμένεται να εξαρτάται από το μέγεθος

και την κατεύθυνση της σχετικής επιτάχυνσης ή περιστροφής των σωμάτων. Οριακά, ουδεμία διαφορά θα προέκιντε για τον Μαχ εάν θεωρούσαμε την περιστροφή ενός υλικού σώματος ως προς το σύστημα των απλανών αστέρων ή εάν θεωρούσαμε ακίνητο το υλικό σώμα και τους απλανείς αστέρες να περιστρέφονται ως προς αυτό. Η συγκεκριμένη παρατήρηση του Μαχ περί πλήρους σχετικοποίησης της κίνησης οδήγησε στη διατύπωση της επονομαζόμενης «αρχής του Μαχ», σύμφωνα με την οποία, *η αδράνεια των υλικών σωμάτων οφείλεται αποκλειστικά στη σχετική επιτάχυνσή τους ως προς την κοσμική ύλη*. Συνεπώς, κατά τη σχεσιοκρατική θεώρηση του Μαχ, η ύλη και η κινητική της κατάσταση είναι ο πρωτομοιχός φορέας της πρόκλησης των αδρανειακών φαινομένων.

Ο Μαχ δεν διατύπωσε βέβαια μια συνολική θεωρία ή ποσοτική σχέση για το προτεινόμενο αποτέλεσμα της «αδρανειακής αλληλεπίδρασης» της ύλης. Αρθρώσε ένα σύνολο ιδεών που έμελλε να επηρεάσει άμεσα τη σκέψη του Αϊνστάιν στη σύλληψη της γενικής θεωρίας της σχετικότητας. Ο όρος «αρχή του Μαχ» καταχωρήθηκε από τον Αϊνστάιν το 1917 και ο ίδιος είχε ήδη επιδιώξει ανεπιτυχώς να ενσωματώσει το περιεχόμενό του στην αρχική διατύπωση της γενικής σχετικότητας. Τοίτο όχι ανατιολόγητα, διότι η οισσωφειμένη πλέον θεωρητική και πειραματική μαρτυρία υποδεικνύουν ότι η αρχή του Μαχ δεν είναι πλήρως συμβιβαστή με το πλαίσιο της νέας αναδυόμενης θεωρίας (βλ. Raine 1975, Torretti 1996).

4. Η σχετικιστική αντίληψη περί χώρου και χρόνου:

Ενότητα χώρου, χρόνου και κίνησης – Ειδική θεωρία σχετικότητας

Η απόρριψη της αντίληψης του νευτώνειου απόλυτου οφείλεται εντέλει στην ανάπτυξη της θεωρίας της σχετικότητας, στις δύο βαθμίδες της, την ειδική και τη γενική. Η ειδική θεωρία της σχετικότητας πρωτοδιατυπώθηκε από τον Αϊνστάιν το 1905. Ο όρος «ειδική» αιτιολογείται λόγω της αποκλειστικής αναφοράς και αντίστοιχης ισχύος της θεωρίας σε μια ιδιαίτερη κλάση συστημάτων αναφοράς, των λεγόμενων *αδρανειακών συστημάτων*, εκείνων δηλαδή που κινούνται το ένα ως προς το άλλο, ευθύγραμμα και ομαλά. Είναι αξιοσημείωτο ότι το οικοδόμημα της ειδικής θεωρίας του Αϊνστάιν εδραιώθηκε ουσιαστικά στις ακόλουθες δύο προτάσεις:

Αρχή της ειδικής σχετικότητας: Όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς είναι ισοδύναμα για την περιγραφή των νόμων της φυσικής.

Αξίωμα της παγκοσμιότητας της ταχύτητας του φωτός: Η ταχύτητα του φωτός, *c*, στο κενό είναι σταθερή και ανεξάρτητη από την κινητική κατάσταση του εκπέμποντος σώματος¹.

Το σύνολο των σχετικιστικών φαινομένων της ειδικής θεωρίας είναι δυνατόν να εξαχθεί κατά λογικώς παραγωγικό τρόπο στη βάση των δύο αντών προτάσεων. Υπ' αυτή την έννοια, η ειδική θεωρία της σχετικότητας αποτελεί «πρότυπο» επιστημονικής θεωρίας όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της θεωρητικής της κατασκευής, επιτυγχάνοντας την ευρύτερη δυνατή σύλληψη γεγονότων υπό την ελάχιστη δυνατή προϋπόθεση αξιωματικών προτάσεων. Η πρόταση (1), λόγου χάρη, η «αρχή της ειδικής σχετικότητας», συνιστά απλώς

επέκταση της γαλιλαϊκής αρχής της σχετικότητας από το πεδίο της νευτώνειας μηχανικής στο σύνολο των νόμων της φυσικής συμπεριλαμβανομένων των νόμων του ηλεκτρομαγνητισμού και της οπτικής (Einstein 1952, σ. 14). Η εμβέλεια της αρχής προηγείται εννοιολογικά του ορισμού των γεωμετρικών αντικειμένων καθώς και της υλοποίησης των φυσικών μεγεθών. Ενώ το περιεχόμενο της αρχής διασφαλίζει την αντικειμενικότητα της φυσικής περιγραφής, προτάσσοντας την ανεξαρτησία ή αμεταβλητότητα των θεμελιωδών φυσικών νόμων από την υιοθέτηση ενός αδρανειακού συστήματος αναφοράς. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το αίτημα της σχετικότητας (ή δοκιμότερα του αναλλοιώτου) έχει ισχύ μεταθεωρητική: συνιστά ενοποιητική, συγκροτούσα αρχή. Αποτελεί όρο δυνατότητας άσκησης της φυσικής επιστήμης. Όσο δε αφορά την αξιωματική πρόταση (2) περί καθολικότητας της ταχύτητας του φωτός, μολονότι ριζοσπαστική κατά την περίοδο ανάπτυξης της ειδικής θεωρίας, αποτελεί πλέον πειραματικώς επικυρωμένο συμβάν (πχ., Alvager et al. 1964).

Το αφετηριακό σημείο του Αϊνστάιν στην ανάπτυξη και συγκρότηση της ειδικής σχετικότητας προέκυψε ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης μεταξύ του νευτώνειου χωροχρονικού πλαισίου και της θεωρητικής δομής του ηλεκτρομαγνητισμού. Ενώ οι νόμοι της νευτώνειας κλασικής μηχανικής διατηρούνται *αναλλοιώτοι (αμετάβλητοι)* ως προς τους συνήθεις μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου,

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t, \quad (1)$$

οι θεμελιώδεις νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού –δηλαδή οι εξισώσεις του Μάξγουελ– διατηρούν αναλλοίωτο το περιεχόμενό τους ως προς μια διαφορετική ομάδα μετασχηματισμών, την ομάδα Λόρεντζ,

$$x' = \gamma (x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \gamma (t - vx/c^2), \quad (2)$$

όπου $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ συμβολίζει τον επονομαζόμενο «παράγοντα Λόρεντζ» και v το μέτρο της σχετικής ταχύτητας κίνησης μεταξύ δύο αδρανειακών συστημάτων αναφοράς $\Sigma (x, y, z, t)$ και $\Sigma' (x', y', z', t')$ κατά τη διεύθυνση του άξονα x .

Κατά τη θεώρηση του Αϊνστάιν, τούτο το στοιχείο *ασυμμετρίας* αρκούσε για να καταδείξει την αδυναμία κάθε μηχανικής εξήγησης της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Επίσης, κατά τον ίδιο, η εν λόγω ασυμμετρία δεν θα ήταν δυνατόν να ενυπάρχει στη φύση των πραγμάτων, διότι αντιτίθεται στην αντικειμενική και κατ' επέκταση ανεξάρτητη από το σύστημα αναφοράς περιγραφή των φυσικών νόμων (παραβίαση της πρότασης 1). Ένας νευτώνειος αδρανειακός παρατηρητής δεν θα ήταν δυνατόν να αναπαράγεται, υπό ισοδύναμες φυσικές συνθήκες, τους νόμους της μηχανικής και του ηλεκτρομαγνητισμού μέσω των μετασχηματισμών του Γαλιλαίου.

Είναι άξιο παρατήρησης ότι οι κλασικές εξισώσεις μετασχηματισμών του Γαλιλαίου αποτελούν οριακή περίπτωση των μετασχηματισμών Λόρεντζ, όταν η σχετική ταχύτητα των συστημάτων Σ και Σ' είναι μικρή συγκριτικά με την ταχύτητα του φωτός, δηλαδή $v/c \ll 1$. Αυτό εξηγεί την υψηλή ακρίβεια των νόμων της νευτώνειας μηχανικής σε ένα ευρύ φάσμα φυσικών φαινομένων. Θα πρέπει να υπογραμμιστεί εντούτοις ότι η χωροχρονική

δομή των μετασχηματισμών Λόρεντζ είναι ριζικώς διαφορετική και μη αναγώγιμη προς εκείνη των μετασχηματισμών του Γαλιλαίου.

Το πλέον ριζοσπαστικό χαρακτηριστικό των μετασχηματισμών Λόρεντζ αποτελεί ο μετασχηματισμός του χρόνου, ο οποίος εκφράζει κατά βάση τη *σχετικότητα της ταυτοχρονίας* (ή *συγχρονικότητας*). Όπως αποτυπώνεται στην τελευταία των Εξ. (2), γεγονότα ισόχρονα του t , βάσει των ενδείξεων των ρολογιών του συστήματος αναφοράς Σ , δεν αντιστοιχούν σε γεγονότα ισόχρονα του t' , βάσει των ενδείξεων των ρολογιών του συστήματος Σ' . Επομένως η εκτίμηση ενός αδρανειακού παρατηρητή ως προς την ταυτοχρονία δύο γεγονότων –δηλαδή ως προς το εάν τα δύο γεγονότα λαμβάνουν χώρα την ίδια χρονική στιγμή– εξαρτάται από την επιλογή του συστήματος αναφοράς που υιοθετείται. Η ύπαρξη αυτού του αποτελέσματος οφείλεται στην καθολικότητα της ταχύτητας του φωτός: το φως έχει την ίδια σταθερή και πεπερασμένη ταχύτητα c σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Εάν η ταχύτητα διάδοσης του φωτός ήταν μη πεπερασμένη, και συνεπώς «ακαριαίως μεταδιδόμενη», κατά την αντίληψη της «στιγμιαίας δράσης από απόσταση» στη νευτώνεια μηχανική, τότε $t' = t$, καταλήγοντας στον απόλυτο χαρακτήρα του νευτώνειου χρόνου.

Κατά τη νευτώνεια αντίληψη, το χωροχρονικό πλαίσιο αναφοράς των γεγονότων συνίστατο στην τυπική (εξωτερική) ένωση του παρελθόντος και μέλλοντος, όριο μεταξύ των οποίων αποτελούσε το «τώρα» ως έκφραση ενός καθολικού παρόντος, κοινού για κάθε αδρανειακό παρατηρητή. Στην ειδική θεωρία του Αϊνστάιν, αντιθέτως, η έννοια του απόλυτου παρόντος είναι απροσδιόριστη. Το παρόν ενός συγκεκριμένου γεγονότος δεν είναι πλέον απόλυτο. Ορίζεται ως «σχετικό τώρα», πάντοτε σε σχέση με την επιλογή ενός αδρανειακού συστήματος αναφοράς. Ο προσδιορισμός του «τώρα» επομένως εξαρτάται από την ταχύτητα ενός ομαλώς κινούμενου παρατηρητή. Το στοιχείο που εισάγει η ειδική θεωρία της σχετικότητας έγκειται στο ότι ο χρόνος συμπεριλαμβάνεται στο εξής στον υπολογισμό της απόστασης. Καθώς αδρανειακά κινούμενοι παρατηρητές αναγνωρίζουν ως ταυτόχρονες διαφορετικές ομάδες γεγονότων, είναι αδύνατον, κατ' επέκταση, να οριστεί κατά μοναδικό τρόπο ο «χώρος». Ο χώρος ως απόλυτο μέτρο είναι ανύπαρκτος. Και όπως δεν υπάρχει απόλυτος χώρος, δεν υπάρχει ούτε απόλυτος χρόνος, διότι ο χρόνος αποτελεί πλέον συνάρτηση της κίνησης στον χώρο. Δεν υπάρχει ούτε η θεωρητική υπόθεση της ταυτοχρονίας, η θεωρητική δυνατότητα να αποφανθούμε ότι η στιγμή αυτή, το «τώρα», είναι η ίδια στιγμή για ολόκληρο τον κόσμο, για το σύνολο των αδρανειακών παρατηρητών (βλ. Karakostas 1997). Η έννοια ενός παγκόσμιου (απόλυτου) «τώρα» είναι αδύνατη, και χρόνος και χώρος είναι έννοιες σχετικές.

Οι ριζοσπαστικές συνέπειες της θεωρίας του Αϊνστάιν εκλήφθηκαν αρχικά από ορισμένους φυσικούς και φιλοσόφους ως να προσέβαλαν άμεσα το κλασικό ιδεώδες μιας ανεξάρτητης φυσικής πραγματικότητας. Εάν τα μέτρα μεγεθών, όπως ο «χώρος», ο «χρόνος», ή η «μάζα», σχετικοποιούνται ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, δηλαδή εξαρτώνται από την εκάστοτε οπτική που υιοθετείται, οι ιδιότητες των φυσικών αντικειμένων θα πρέπει να θεωρούνται απλώς ως σχέσεις μεταξύ ενός αντικειμένου και ενός παρατηρητή. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η θέση αυτή του γνωσιολογικού σχετικισμού είναι επιλεκτική και κατ' επέκταση παραπλανητική.

Το ουσιαστικό περιεχόμενο της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας δεν έγκειται στη σχε-

τικότητα του χώρου και του χρόνου. Αντιθέτως, εδράζεται στην αλληλεξάρτηση και συνένωσή τους. Η αρχή του αναλλοίωτου της ταχύτητας διάδοσης του φωτός, καθώς και όλων ανεξαιρέτως των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων, ως προς κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς, οδήγησε στη συγκρότηση ενός τετραδιάστατου πλαισίου ενότητας του χώρου και του χρόνου, του *χωροχρόνου Μινκόφσκι* (Minkowski). Εδώ ο χώρος και ο χρόνος απογυμνώνονται από τον απόλυτο και αυτόνομο χαρακτήρα της κλασικής νευτώνειας αντίληψης. Χώρος και χρόνος συσχετίζονται και σχετικοποιούνται. «Στο εξής ο χώρος καθεαυτὸν και ο χρόνος καθεαυτὸν είναι καταδικασμένοι να ξεθωριάσουν μετατρεπόμενοι απλώς σε σκιές και μόνο ένα είδος ενότητας των δύο θα διατηρήσει ανεξάρτητη πραγματικότητα», διακήρυττε το 1908 ο θεμελιωτής της έννοιας του τετραδιάστατου χωροχρονικού συνεχούς, γερμανὸς μαθηματικὸς Μινκόφσκι (1908, σ. 54).

Το σημαντικό στοιχείο στη θεώρηση του Μινκόφσκι δεν είναι ότι ο «χρόνος» υπεισέρχεται απλώς ως μια άλλη «τέταρτη διάσταση» για την περιγραφή των γεγονότων, αλλά ότι αυτά που κοινώς θεωρούντο στο τρισδιάστατο ευκλείδειο πλαίσιο ως «διαστήματα απόστασης στον χώρο» και «διαστήματα διάρκειας στον χρόνο» αποτελούν πλέον συνιστώσες ενός «ενοποιημένου διαστήματος» στον χωρόχρονο. Ενώ τα χωρικά και χρονικά διαστήματα μεταξύ δύο δοθέντων γεγονότων $\Gamma_1(x_1, y_1, z_1, t_1)$ και $\Gamma_2(x_2, y_2, z_2, t_2)$ των οποίων οι συντεταγμένες διαφέρουν κατά $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t)$, όταν μετρώνται μεμονωμένα, εξαρτώνται από την επιλογή ενός αδρανειακού συστήματος αναφοράς, το μεταξύ τους *διάστημα* Δs^2 στον τετραδιάστατο χωρόχρονο Μινκόφσκι

$$\Delta s^2 = (c \Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2 \quad (3)$$

είναι ένα *αναλλοίωτο* μέγεθος, διατηρείται δηλαδή *σταθερό*, ανεξάρτητα από την επιλογή οποιουδήποτε αδρανειακού συστήματος αναφοράς. Έτσι κάθε αδρανειακὸς παρατηρητὴς διαπιστώνει την ίδια τιμὴ της «απόστασης» μεταξύ δύο διαφορετικῶν γεγονότων στον χωρόχρονο Μινκόφσκι. Η ποσότητα Δs^2 συνιστᾷ επομένως ένα θεμελιώδες μέγεθος για τον *αντικειμενικὸ* χαρακτηρισμὸ της σχέσης μεταξύ των διαφόρων γεγονότων, ανεξάρτητα από την επιλογή των θεωρούμενων συστημάτων αναφοράς.

Η ονομασία της ειδικῆς θεωρίας του Αϊνστάιν ως ειδικῆς θεωρίας της σχετικότητας δίνει ἔμφαση μόνο σε επιλεγμένες, μη πλήρεις ὀψεις της θεωρίας. Είναι ενδεικτικὴ η πρόταση του Αϊνστάιν για την αντικατάσταση του ὅρου «θεωρία της σχετικότητας» με τον ὅρο «θεωρία του σημείου αναφοράς» («Standpunktslehre»). Η σχετικότητα του χώρου και του χρόνου (ή μεγεθῶν ὅπως της μάζας, της ἐνέργειας κ.λπ.) εμφανίζεται στο τρισδιάστατο ευκλείδειο πλῆθος, το οποίο είναι ανεπαρκές για την ενσωμάτωση και περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικῶν φαινομένων. Όταν ὁμως η εξέταση των φαινομένων υποβάλλεται στο φυσικὸς εμπλουτισμένο τετραδιάστατο χωροχρονικὸ πλαίσιο του Μινκόφσκι, η έννοια του σχετικὸυ φανερώνεται ως εκδήλωση του απόλυτου (βλ. επίσης Μπιτσάκης 1996). Η κατὰ Μινκόφσκι ερμηνεία αποκαλύπτει νέα *σχετικιστικά*, μη σχετικά, μεγέθη –το τετραδιάστατο χωροχρονικὸ διάνυσμα, το τετράνυσμα ορμῆς-ἐνέργειας, τον τετραταχυοσὴ ηλεκτρικὸυ και μαγνητικὸυ πεδίου κ.λπ.– τα οποία είναι αναλλοίωτα ὑπὸ τους μετασχηματισμοὺς Λόρεντζ και ικανοποιούν συνεπὶς τη συνθήκη της φυσικῆς αντικειμενικότητας. Το περιεχόμενο της

ειδικής θεωρίας αφορά κατ' ουσίαν την αναζήτηση αναλλοίωτων σχέσεων και μεγεθών, ως στοιχείων χαρακτηριστικών της δομής του χωροχρόνου. Η καθολικότητα της ταχύτητας του φωτός είναι στην πραγματικότητα μια δομική σταθερά η οποία προσδιορίζει τη γεωμετρία του τετραδιάστατου χωροχρονικού συνεχούς (π.χ., Zeeman 1964, Friedman 1983). Υπ' αυτή τη θεώρηση θα μπορούσε κάλλιστα να ειπωθεί ότι η ειδική θεωρία της σχετικότητας πρεσβεύει, αντί της σχετικότητας, το αναλλοίωτο των φυσικών νόμων, δηλαδή την ανεξαρτησία τους από το υιοθετούμενο σύστημα αναφοράς, ως έκφραση προσδιορισμού των ορίων του απόλυτου.

5. Ενότητα χωροχρόνου, κίνησης και ύλης: Γενική θεωρία σχετικότητας

Η ειδική θεωρία της σχετικότητας ενοποίησε τους νόμους της μηχανικής και της ηλεκτροδυναμικής, καταδεικνύοντας την αλληλεξάρτηση του χώρου και του χρόνου. Η χωροχρονική δομή Μινκόφσκι της ειδικής θεωρίας, όμως, έχει χαρακτήρα στατικό. Είναι εξαρχής και διά παντός καθορισμένη. Δεν επηρεάζεται από την παρουσία και την κίνηση της ύλης. Η ειδική θεωρία περιγράφει νόμους και φαινόμενα της φυσικής ελλείπει των βαρυτικών πεδίων της ύλης. Άμεσα λοιπόν προβάλλει το μείζον πρόβλημα της θεμελίωσης μιας νέας σχετικιστικής θεωρίας της βαρύτητας.

Η γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν (1916) επιτυγχάνει αυτό ακριβώς: «επεκτείνει» την ειδική θεωρία κατά τέτοιον τρόπο ώστε να καθιστά δυνατή τη μελέτη και της ίδιας της βαρύτητας. Ο Αϊνστάιν επιδίωξε να προσδώσει στον νόμο της βαρύτητας σχετικιστική μορφή, δηλαδή μορφή ανεξάρτητη από το σύστημα αναφοράς. Στη γενική θεωρία το βαρυτικό πεδίο συνιστά ενδογενές στοιχείο της δομής του χωροχρόνου. Τα αποτελέσματά του αντανakλώνται στην καμπύλωση του χωροχρόνου, οι δε συνέπειές του δεν εξαρτώνται εν γένει από την επιλογή ενός ιδιαίτερου συστήματος αναφοράς ή την υιοθέτηση ενός κατάλληλου μετασχηματισμού συντεταγμένων.

Ο Αϊνστάιν θεμελίωσε τη γενική θεωρία της σχετικότητας συνυφαίνοντας την αρχή της ισοδυναμίας (αδρανειακής-βαρυτικής μάζας) και την αρχή της αδράνειας με τη γεωμετρική δομή του καμπύλου χώρου Ρήμαν (Riemann). Σύμφωνα με την αρχή της ισοδυναμίας, πάντοτε υπάρχει ένα τοπικό σύστημα αναφοράς σε ελεύθερη πτώση, ως προς το οποίο το βαρυτικό πεδίο δεν έχει επίδραση στην κινητική κατάσταση των σωμάτων ή σε οποιαδήποτε άλλη φυσική διαδικασία. Προκύπτει δε ως επακόλουθο της αρχής της ισοδυναμίας ότι, σχετικά με ένα σύστημα αναφοράς σε ελεύθερη πτώση, ένα υλικό σώμα δεν εμφανίζει κάποιο είδος επιτάχυνσης εντός του δυναμικού ενός πεδίου βαρύτητας και συνεπώς διαγράφει, τουλάχιστον τοπικά, ευθεία τροχιά. Ο ριζοσπαστικός συλλογισμός του Αϊνστάιν κατά την ανάπτυξη της γενικής θεωρίας συνίσταται συνακόλουθα στην εξής πρόταση: οι ευθείες τροχιές των σωμάτων στο τοπικώς αδρανειακό σύστημα αναφοράς οφείλουν να θεωρηθούν ως οι γεωδαισιακές καμπύλες, δηλαδή ως οι κατεξοχήν «ευθείες» κοσμικές γραμμές στον πλήρη καμπυλωμένο χωρόχρονο Ρήμαν. Έτσι οι τροχιές των σωμάτων σε ελεύθερη πτώση ταυτοποιούνται με τις τοπικά ευθείες γραμμές μιας καμπυλωμένης γεωμετρίας.

Αυτή η πρόταση γενικεύει τον νευτώνειο νόμο της αδράνειας, ενσωματώνοντας τα φαι-

νόμους της αδράνειας και της βαρύτητας σε μια συνθήκη. Βαρύτητα και αδράνεια αποτελούν πλέον εναλλακτικούς χαρακτηρισμούς ενός και του αυτού φαινομένου. Αυτό που καθίσταται αντιληπτό ως αδρανειακό φαινόμενο από έναν παρατηρητή, εκλαμβάνεται ως αποτέλεσμα της δράσης ενός πεδίου βαρύτητας από έναν άλλον. Ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς είναι πλήρως ισοδύναμο, όσον αφορά κάθε φυσική περιγραφή, με ένα σύστημα σε ελεύθερη πτώση. Ο χαρακτηρισμός του φαινομένου ως αδρανειακού ή βαρυτικού εξαρτάται συνεπώς από την υιοθέτηση ενός κατάλληλου συστήματος αναφοράς ως προς το οποίο μελετώνται οι φυσικοί νόμοι (π.χ., Misner et al. 1973).

Η αρχή της αδράνειας ισχύει τώρα αυστηρώς τοπικά. Η δε έννοια της νευτώνειας αδράνειας αποκτά εντελώς διαφορετικό νόημα: εμφανίζεται όχι ως το μέτρο αντίστασης της ύλης στη μεταβολή της κινητικής της κατάστασης, αλλά ως το *δυναμικό αποτέλεσμα* της ύλης επί του χωροχρόνου. Κάθε υλικό σώμα τροποποιεί τη μορφή του περιβάλλοντος χωροχρόνου, τον «στρεβλώνει», όπως ένα βάρος καμπυλώνει μια επίπεδη ελαστική μεμβράνη πάνω στην οποία βρίσκεται. Η έννοια της νευτώνειας βαρύτητας αποκτά επίσης εντελώς διαφορετικό νόημα: δεν κατανοείται πλέον ως αυθύπαρκτη φυσική οντότητα, ως ένα εξωγενές πεδίο δυνάμεων που δρα επί του χωροχρόνου, αλλά εκλαμβάνεται ως σύμφυτο στοιχείο και παράγοντας καθορισμού της ίδιας της δομής του χωροχρόνου.

Ο χωροχρόνος της γενικής θεωρίας της σχετικότητας είναι ένας *καμπύλος* τετρα-διάστατος χωροχρόνος, μεταβλητής καμπυλότητας, του οποίου η δομή (ή η *μετρική Ρήμαν*) ds^2_R ,

$$\begin{aligned} ds^2_R = & g_{11}dx^2_1 + g_{22}dx^2_2 + g_{33}dx^2_3 + g_{44}dx^2_4 \\ & + 2g_{12}dx_1dx_2 + 2g_{13}dx_1dx_3 + 2g_{14}dx_1dx_4 \\ & + 2g_{23}dx_2dx_3 + 2g_{24}dx_2dx_4 + 2g_{34}dx_3dx_4, \end{aligned} \quad (4)$$

περιγράφει το πεδίο βαρύτητας που δημιουργείται από την κατανομή της κοσμικής ύλης. Οι μετρικές ιδιότητες του χωροχρόνου Ρήμαν περιγράφονται από τις δέκα ανεξάρτητες συνιστώσες του μετρικού τανυστή $g_{\mu\nu}$ ($\mu, \nu = 1, 2, 3, 4$), οι οποίες στη φυσική ορολογία κατανοούνται ως *δυναμικά* του βαρυτικού πεδίου. Σε ένα τοπικά αδρανειακό σύστημα αναφοράς του καμπύλου χωροχρόνου Ρήμαν, τα δυναμικά του βαρυτικού πεδίου για $\mu \neq \nu$ ($g_{12}, g_{13}, g_{14}, g_{23}, g_{24}, g_{34}$) μηδενίζονται και η μετρική Ρήμαν λαμβάνει τη μορφή της μετρικής Μινκόφσκι ($g_{22} = g_{33} = g_{44} = -1, g_{11} = +1$). Οι νόμοι της ειδικής σχετικότητας διατηρούν επομένως την ισχύ τους σε ένα τοπικά αδρανειακό σύστημα αναφοράς του καμπύλου χωροχρόνου. Η ειδική σχετικότητα εμφανίζεται κατ' αυτόν τον τρόπο ως μια τοπική θεωρία, «οριακή» περίπτωση της γενικής σχετικότητας, ισχύουσα σε μια απειροστή περιοχή της δομής της.

Στη γενική θεωρία του Αϊνστάιν η έννοια της βαρύτητας γεωμετριοποιείται και ερμηνεύεται ως *το αίτιο* καμπύλωσης του χωροχρόνου. Η δομή του χωροχρόνου Ρήμαν της γενικής σχετικότητας αποκτά έτσι χαρακτήρα *δυναμικό*: η μορφή του μεταβάλλεται με τον χρόνο συναρτήσει της κίνησης των υλικών σωμάτων. Στη νέα χρονογεωμετρική θεωρία της βαρύτητας ο «χώρος» και ο «χρόνος» δεν αποτελούν απλώς συνιστώσες μιας δεδομένης σύνθετης οντότητας, όπως στην περίπτωση του επίπεδου χωροχρόνου Μινκόφσκι. Ο τρόπος σύνθεσής τους καθορίζεται πλέον από την κατανομή και την κινητική κατάσταση της ύλης σε κάθε σημείο του τετραδιάστατου χωροχρονικού συνεχούς. Η καμπυλότητα του χώ-

ρου, όπως και η ροή του χρόνου, αποτελούν συναρτήσεις των δυναμικών του βαρυτικού πεδίου, δηλαδή της κατανομής της κοσμικής ύλης. Καθώς η μορφή του φυσικού χώρου μεταβάλλεται με τον χρόνο, το μέτρο του μήκους και του χρόνου, οι τροχιές των σωμάτων κ.λπ., επίσης μεταβάλλονται. Στην περιοχή ισχυρών βαρυτικών πεδίων ο ρυθμός του χρόνου –δηλαδή η συχνότητα των περιοδικών ομοιόμορφων κινήσεων– επιβραδύνεται, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται αντίστοιχα οι χρονικές διαφορές των γεγονότων. Η δυνατότητα, στην ειδική σχετικότητα, του συγχρονισμού των ρολογιών ενός και του αυτού συστήματος αναφοράς παύει να ισχύει στη γενική θεωρία (π.χ., Ellis et al. 1988). Εδώ ο ρυθμός του χρόνου μεταβάλλεται μεταξύ χωρικά διαχωρισμένων σημείων του ίδιου συστήματος αναφοράς. Μεταβάλλεται ακόμη για ένα και το αυτό σημείο του χώρου. Ο ρυθμός του χρόνου αποτελεί πλέον συνάρτηση της υλικής κατανομής και των μεταβολών της.

Στη θεωρία βαρύτητας του Αϊνστάιν η μεταβλητότητα των ιδιοτήτων της πραγματικότητας παρουσιάζεται ως εκδήλωση της αλληλεπίδρασης –της ενδογενούς σχέσης– του χώρου και του χρόνου, της κίνησης και της ύλης. Η δομή του χωροχρόνου, η κατανομή της ύλης και η κίνηση συνιστούν οργανική ολότητα. Το σύμπαν κατανοείται όχι ως προδιαγεγραμμένος μηχανισμός, κατά το στατικό πρότυπο της κλασικής νευτώνειας φυσικής, αλλά ως ενιαίο και αυτοκαθοριζόμενο όλο σε αέναη μεταλλαγή και εξέλιξη.

Η θεωρία βαρύτητας του Αϊνστάιν απεικονίζει τη φυσική από τον μηχανιστικό χαρακτήρα της νευτώνειας «βαρυτικής δύναμης» και τη συνακόλουθη δύσκολα κατανοούμενη έννοια της «ακαριαίας εξ αποστάσεως δράσης». Η νευτώνεια «δύναμη» της βαρύτητας αντικαθίσταται από το βαρυτικό πεδίο της ύλης, ενώ το τελευταίο ερμηνεύεται γεωμετρικά ως η μετρική του καμπύλου χωροχρόνου Ρήμαν. Η ύλη δεν εκπέμπει κάποιο είδος «δύναμης», όπως η νευτώνεια αντίληψη αποδεχόταν, αλλά παραμορφώνει το τετραδιάστατο συνεχές. Η κίνηση δεν αποδίδεται πλέον στη δράση δυνάμεων αλλά στην καμπύλωση του χωροχρονικού συνεχούς που συνυφαίνεται με την ύπαρξη της ύλης. Οι τροχιές, λόγω χάφ, των πλανητών του ηλιακού μας συστήματος δεν καθορίζονται από την επένεργεια «βαρυτικών δυνάμεων», αλλά από την καμπύλωση του χώρου που προκαλεί το βαρυτικό πεδίο του Ήλιου.

Σύμφωνα με τη θεωρία βαρύτητας του Αϊνστάιν η δομή του χωροχρόνου –δηλαδή η μετρική Ρήμαν– καθορίζεται από την κατανομή και την κίνηση της ύλης, ενώ ο χωροχρόνος καθεαυτός προσδιορίζει τους τρόπους κίνησης της ύλης. Η δομή του χωροχρόνου είναι συντονισμένη με την ολική κατανομή μάζας-ενέργειας στο σύμπαν, οπότε οι αμοιβαίες μεταβολές μεταξύ των δύο αυτών συσχετιζόμενων παραγόντων προκαλούν εξατέροθεν αλλαγές, οι οποίες διαδίδονται τοπικά με μέγιστη δυνατή ταχύτητα την ταχύτητα του φωτός. Συνεπώς η ακαριαία δράση από απόσταση εξαλείφεται.

Το επίτευγμα του Αϊνστάιν κατά την ανάπτυξη της γενικής θεωρίας της σχετικότητας συνίσταται στην εγκαθίδρυση της ενότητας μεταξύ της μετρικής του καμπύλου χωροχρόνου Ρήμαν και του βαρυτικού πεδίου. Τυπική έκφραση αυτής της ενότητας, από μαθηματική άποψη, αποτελεί το γεγονός ότι τόσο η μετρική όσο και το βαρυτικό πεδίο αποδίδονται από το ίδιο σύνολο ποσοτήτων, τον θεμελιώδη μετρικό τανυστή $g_{\mu\nu}$. Η σύνδεση μεταξύ του μετρικού τανυστή και της κατανομής της ύλης δίνεται από τις εξισώσεις πεδίου της γενικής θεωρίας

$$R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R = (-8\pi G/c^4) T_{\mu\nu}, \quad (5)$$

όπου $R_{\mu\nu}$ και $T_{\mu\nu}$ είναι οι τανυστές «καμπυλότητας» και ενέργειας-ορμής, αντιστοίχως, και G η παγκόσμια βαρυτική σταθερά².

Το αριστερό μέλος των εξισώσεων πεδίου χαρακτηρίζει τη δομή του χωροχρόνου, συγκεκριμένα την καμπυλότητά του υπό την παρουσία της ύλης. Το δεξιό μέλος περιγράφει την κατανομή της ολικής ύλης (μάζας-ενέργειας) στον χωροχρόνο. Το φυσικό νόημα των εξισώσεων πεδίου του Αϊνστάιν έγκειται ακριβώς στην περιγραφή του τρόπου με τον οποίο η κατανομή της ύλης στον χωροχρόνο επηρεάζει τη δομή του και δημιουργεί το βαρυτικό πεδίο, καθώς και το πώς το βαρυτικό πεδίο με τη σειρά του καθορίζει τους τρόπους κίνησης και κατανομής της ύλης. Συγκροτείται λοιπόν ένα είδος αλληλεξάρτησης των εννοιών χώρου, χρόνου, κίνησης και ύλης, που στο πλαίσιο της χρονογεωμετρικής θεωρίας βαρύτητας του Αϊνστάιν και των αναπτύξεών της αποκτά τη συνθετότερη και πληρέστερη προς το παρόν μορφή. Έτσι η θεωρία της σχετικότητας στις δύο βαθμίδες της, την ειδική και τη γενική, επέφερε, έναντι του κλασικού νευτώνειου προτύπου, μια εννοιολογική επανάσταση στη φυσική επιστήμη, η οποία είναι σήμερα εν εξελίξει κυρίως στην προσπάθεια σύνθεσης της γενικής θεωρίας της σχετικότητας με την κβαντική θεωρία της ύλης.

Σημειώσεις

1. Ο Αϊνστάιν, ήδη στην εισαγωγή του άρθρου του «Επί της ηλεκτροδυναμικής των κινουμένων σωμάτων», ορίζει την αξιωματική δομή της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας κατά τον ακόλουθο τρόπο: «Παραδείγματα αυτού του είδους [δηλαδή φαινόμενα όπως η αμοφαία αλληλεπίδραση μαγνήτη και αγωγού], σε συνδυασμό με τις ανεπτυχθείς απόπειρες να ανακαλυφτεί οποιαδήποτε κίνηση της γης ως προς το "φωτεινό μέσο", υποδεικνύουν το γεγονός ότι ορισμένα φαινόμενα του ηλεκτρομαγνητισμού και της μηχανικής δεν παρουσιάζουν ιδιότητες που να αντιστοιχούν στην ιδέα της απόλυτης ηρεμίας. Μάλλον υποδεικνύουν ότι ... οι ίδιοι νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού και της οπτικής θα ισχύουν για όλα τα συστήματα αναφοράς για τα οποία διατηρούν την ισχύ τους οι εξισώσεις της μηχανικής. Θα θέσουμε την εικασία αυτή (που σκοπεύουμε στο εξής να την αποκαλούμε "Αρχή της Σχετικότητας") ως αξίωμα, και θα εισαγάγουμε επίσης άλλο ένα αξίωμα, το οποίο φαινομενικά μόνο είναι ασυμβίβαστο με το πρώτο, ότι το φως διαδίδεται πάντοτε στο κενό με καθορισμένη ταχύτητα c , η οποία είναι ανεξάρτητη της κινητικής κατάστασης του εκπέμποντος σώματος». (1905, σ. 891)

2. Ειδικότερα η έκφραση $R_{\mu\nu}$ αντιστοιχεί στον λεγόμενο τανυστή Ricci, ο οποίος προκύπτει από τον τέταρτης τάξης τανυστή καμπυλότητας (ή τανυστή Ρήμαν), $R^{\lambda}_{\mu\alpha\beta}$, διά της μαθηματικής μεθόδου της «συστολής» ως προς τον πρώτο και τον τρίτο δείκτη, ενώ η ποσότητα $R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$ αποτελεί το βαθμωτό Ricci.

Βιβλιογραφία

- Alexander H., (1956), *The Leibniz – Clarke Correspondence*, Manchester: Manchester University Press.
 Alvager T., Farley F., Kjellman J., and Wallin I., (1964), «Test of the Second Postulate of Relativity in the GeV Region», *Physics Letters* 12, 260-262.
 Berkeley G., (1710/1949), *Principles of Human Knowledge: The Works of George Berkeley*, εκδ. των A. Luce και T. Jessop, τόμ. I, Εδιμβούργο (τίτλος Πρωτοτύπου: *A Treatise Concerning the Principles of Human Knowledge*, Dublin: A. Rhames).
 Einstein A., (1905/1952), «On the Electrodynamics of Moving Bodies», στο W. Perrett και G. B. Jeffery (επιμ.), *The Principle of Relativity* (τίτλος Πρωτοτύπου: «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», *Annalen der Physik* 17, 891-921).

- , (1916/1952), «The Foundation of the General Theory of Relativity», στο W. Perrett και G. B. Jeffery (επιμ.), *The Principle of Relativity* (τίτλος πρωτοτύπου: "Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik* 49, 769-822).
- , (1952), *Relativity: The Special and the General Theory*, 15th edition, New York: Crown Publishers.
- Ellis, G. F. R., and Williams M. R., (1988), *Flat and Curved Space-Times*, Oxford: Clarendon Press.
- Friedman M., (1983), *Foundations of Space-Time Theories*, Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Karakostas V., (1997), «The Conventionality of Simultaneity in the Light of the Spinor Representation of the Lorentz Group», *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 28, 249-276.
- Mach E., (1883/1960), *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Development*, μτφ. T. J. McCormack, La Salle: Open Court (τίτλος πρωτοτύπου: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Λυψία: F. A. Brockhaus).
- Minkowski H., (1908/1952), «Space and Time», στο W. Perrett και G. B. Jeffery (επιμ.), *The Principle of Relativity* (τίτλος πρωτοτύπου: «Raum und Zeit», *Physikalische Zeitschrift* [1909] 10, 104-111).
- Misner, C. W., Thorne, S. K., and Wheeler, A. J. (1973), *Gravitation*, San Francisco: Freeman.
- Μπιτοάκης Ε., (1996), *Είναι και Γίνεσθαι*, δ' έκδοση, Αθήνα: Στάχυ.
- Newton I., (1687/1934), *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Londini: Jussu Societatis Regiae as Typis Josephi Streater. Αρχική μετάφραση A. Moote (1729), αναθεωρημένη μετάφραση F. Cajori, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World*, Berkeley: University of California Press.
- Perrett W. και Jeffery G. B., (επιμ.) (1923/1952), *The Principle of Relativity: A Collection of Original Memoirs on the Special and General Theory of Relativity*, New York: Dover. Εγκυρότερη μετάφραση των έργων του Αϊνστάιν συναντάται στο J. Stachel (επιμ.) (1989), *The Collected Papers of Albert Einstein*, Princeton: Princeton University Press.
- Raine, D. J. (1975), «Mach's Principle in General Relativity», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 171, 507-528.
- Torretti, R. (1996), *Relativity and Geometry*, New York: Dover.
- Zeeman E. C. (1964), «Causality Implies the Lorentz Group», *Journal of Mathematical Physics* 5, 490-493.



Leonora Carrington, Ξυλόγλυπτη παρασημοφορημένη γυναίκα, 1951



Remedios Varo (Ισπανίδα, 1908-1963), Αγωνία, 1956