

ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΙΝΣΤΑΙΝ*

Τὸ χρόνο πὸν πέρασε — τὸ 1966 — πολλές ἡμερομηνίες συνδέθηκαν μὲ τὸ ὄνομα τοῦ Einstein: ἡ 10ῃ ἐπέτειος τοῦ θανάτου του, ἡ 60ῃ ἐπέτειος τῆς θεωρίας τῆς σχετικότητας (πὸν συνήθως ὀνομάζεται «εἰδική») καὶ ἡ 50ῃ ἐπέτειος τῆς θεωρίας του γιὰ τὴ βαρύτητα: τὸ Νοέμβριο τοῦ 1915 ὁ Einstein ἔκανε τὴν πρώτη ἀνακοίνωση πάνω σ' αὐτὸ τὸ θέμα στὴν Ἀκαδημία Ἐπιστημῶν τοῦ Βερολίνου.

Ἡ θεωρία τῆς βαρύτητας τοῦ Einstein εἶναι μιὰ θεωρία ἐντυπωσιακῆς τελειότητας καὶ ὁμορφιάς. Συμφωνεῖ μὲ τὴν παρατήρηση σ' ὅλες τὶς περιπτώσεις πὸν ἐπιδέχεται πειραματικὴ ἐπαλήθευση. Ἀνοίγει ἀπεριόριστους ὀρίζοντες γιὰ τὴ γνώση τοῦ σύμπαντος. Ἡ θεωρία τοῦ Einstein εἶναι συνάμα θεωρία τῆς βαρύτητας καὶ θεωρία τοῦ χωρόχρονου· μπορεῖ κάλλιστα νὰ ὀνομαστεῖ *χρονογεωμετρικὴ θεωρία τῆς βαρύτητας*.

Ὡστόσο τὸ παραδοσιακὸ τῆς ὄνομα δὲν εἶναι θεωρία τῆς βαρύτητας, ἀλλὰ «γενικὴ θεωρία τῆς σχετικότητας». Ἡ ὀνομασία αὐτὴ εἶναι ἐντελῶς ἀκατάλληλη καὶ παραπλανητικὴ. Εἶναι λοιπὸν ἀνάγκη νὰ κάνουμε μερικὲς παρατηρήσεις σχετικὰ μὲ τὸ ὄνομα τῆς θεωρίας.

Ἡ θεωρία τοῦ Einstein τοῦ 1905 — ἡ λεγόμενη εἰδικὴ θεωρία τῆς σχετικότητας — εἶναι, ὅπως καὶ ἡ θεωρία τοῦ 1915, μιὰ θεωρία τοῦ χώρου καὶ τοῦ χρόνου, καὶ ἡ ὀνομασία «χρονογεωμετρία», πὸν προτάθηκε ἀπὸ τὸ Δανὸ φυσικὸ Fokker, χαρακτηρίζει τὴν οὐσία τῆς θεωρίας, πολὺ καλύτερα ἀπ' ὅ,τι τὸ παραδοσιακὸ: «θεωρία τῆς σχετικότητας». Εἶναι ἀλήθεια ὅτι ἡ ἀρχὴ τῆς σχετικότητας τοῦ Γαλιλαίου, πὸν ἀφορᾷ τὴν ὁμοιόμορφη κίνηση, παίζει οὐσιαστικὸ ρόλο σ' αὐτὴ τὴ θεωρία. (Ἐννοῶ τὴ γενικευμένη διατύπωση αὐτῆς τῆς ἀρχῆς, ὅπως ἐκφράζεται ἀπὸ τοὺς μετασχηματισμοὺς τοῦ Lorentz, στοὺς ὁποίους λαβαίνονται ὑπόψη ἡ πεπερασμένη τιμὴ τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός.) Αὐτὸ δικαιολογεῖ ὡς ἓνα βαθμὸ τὴν ὀνομασία «θεωρία τῆς σχετικότητας» (χωρὶς ὡστόσο τὸ ἐπίθετο «εἰδική»), μιὰ καὶ οἱ μετασχηματισμοὶ τοῦ Lorentz εἶναι οἱ πιὸ γενικοὶ μετασχηματισμοὶ πὸν ἐκφράζουν τὴν ἔννοια

*Τὸ κείμενο αὐτὸ παρουσιάστηκε σὲ ἓνα σεμινάριο πὸν ἔγινε στὸ Institut Poincaré τὸ 1966. Δόθηκε στὸν κ. Ε. Μπιτσάκη γιὰ δημοσίευση στὸ περιοδικὸ «Σύγχρονα θέματα» πὸν ὁμως ἀναγκάστηκε νὰ διακόψει τὴν ἐκδοσὴ του μὲ τὴν ἐπέλευση τῆς δικτατορίας. Δημοσιεύεται λοιπὸν ἐδῶ «ἐξ ἐπαγωγῆς» μὲ τὴν ἄδεια τοῦ συγγραφέα. Τίτλος τοῦ πρωτότυπου: General Principles of Einstein's Gravitation Theory.

της σχετικότητας στο χωρόχρονο). Ἄλλὰ ἡ οὐσία τῆς θεωρίας τῆς σχετικότητας βρίσκεται στὰ ἀξιώματα πὸ ἀφοροῦν τὶς ἰδιότητες τοῦ χώρου - καὶ - χρόνου, καὶ τὰ ἀξιώματα αὐτὰ ἔχουν ἀπόλυτο χαρακτήρα. Βεβαιώνουν καταρχὴν τὴν ὑπαρξὴ μιᾶς ὀριακῆς ταχύτητας γιὰ τὴ διάδοση ὁποιασδήποτε μορφῆς δράσης, καί, κατὰ δεύτερο λόγο, τὴν ὁμοιομορφία τοῦ χώρου καὶ τοῦ χρόνου.

Ὡστόσο, τὸ θέμα τῆς ἀνακοίνωσής μου δὲν εἶναι ἡ θεωρία τοῦ Einstein τοῦ 1905, ἀλλὰ ἡ θεωρία τοῦ 1915 — ἡ θεωρία του γιὰ τὴ βαρύτητα — καὶ ἡ ὀνομασία «γενικὴ σχετικότητα» εἶναι ἀκόμα πιὸ παραπλανητικὴ ἀπὸ τὴν ὀνομασία «σχετικότητα» γιὰ τὴ θεωρία τοῦ 1905. Κι αὐτό, γιὰ τὴ ἔννοια τῆς σχετικότητας δὲν γενικεύεται, ἀλλὰ περιορίζεται στὴ λεγόμενη «γενικὴ» θεωρία. Αὐτὸ πὸ γενικεύεται δὲν εἶναι ἡ ἔννοια αὐτή, ἀλλὰ ἡ ἔννοια τῆς γεωμετρίας.

Μπορεῖ κανεὶς νὰ ρωτήσῃ: εἶναι ἀνάγκη νὰ δίνεται τόση προσοχὴ στὸ ὄνομα μιᾶς φυσικῆς θεωρίας; Τὸ ὄνομα, ἔστω καὶ ἀκατάλληλο, δὲν ἀλλάζει τίποτα. Δὲ μπορῶ νὰ συμφωνήσω μὲ αὐτὴν τὴν ἀντίρρηση. Τὸ ὄνομα μιᾶς θεωρίας, ἢ γενικὰ μιᾶς ἀνακάλυψης, ἐνέχει συχνὰ μιὰν ἑρμηνεία τῆς θεωρίας ἢ τῆς ἀνακάλυψης. Ἐνα ἀκατάλληλο ὄνομα ἀντανεκλᾷ μιὰ λαθασμένη ἑρμηνεία. Τέτοιο εἶναι τὸ ὄνομα Δυτικὲς Ἰνδίες, πὸ ἔδωκε ὁ Κολόμβος στὰ νησιά πὸ βρίσκονται κοντὰ στὴν Ἀμερικανικὴ ἡπειρο· αὐτὸ ὀφείλεται σὲ σφάλμα τοῦ ἐξερευνητῆ. Ἄλλὰ ἐνῶ κανεὶς δὲν ἰσχυρίζεται ὅτι οἱ Δυτικὲς Ἰνδίες εἶναι τὸ δυτικὸ τμήμα τῶν Ἰνδιῶν, πολλοὶ ἔχουν ἀκόμα τὴ γνώμη ὅτι ἡ γενικὴ σχετικότητα γενικεύει τὴν ἔννοια τῆς σχετικότητας. Γιὰ νὰ ἀποφύγουμε μιὰ τέτοια παρανόηση, εἶναι ἀνάγκη νὰ εἶμαστε πιὸ προσεκτικοὶ μὲ τὶς ὀνομασίες. Θὰ ὀνομάσω λοιπὸν τὴ θεωρία τοῦ Einstein «χρονογεωμετρικὴ θεωρία τῆς βαρύτητας», ἢ, ἀπλά, «θεωρία τῆς βαρύτητας».

Χρησιμοποίησα τὴ λέξη «σφάλμα τοῦ ἐξερευνητῆ» καὶ τόλμησα νὰ συσχετίσω αὐτὲς τὶς λέξεις μὲ τὸν Einstein. Αὐτὸ εἶναι δυνατὸ νὰ προκαλέσει διαμαρτυρίες. Μπορεῖ νὰ πεῖ κανεὶς: ἐπιτρέπεται νὰ τοῦ κάνουμε ἐπικρίσεις; Δὲν εἶναι μιὰ μεγαλοφυΐα, πέρα ἀπὸ κάθε κριτικὴ;

Δὲν εἶμαι σύμφωνος μ' αὐτὴ τὴν ἄποψη. Εἶμαι ἐναντίον κάθε λατρείας τοῦ προσώπου του καὶ δὲν ἀποδέχομαι τὸ δόγμα πὸς δὲν μπορεῖ νὰ κάνει λάθη. Τὰ ἐπιστημονικὰ ἐπιτεύγματα τοῦ Einstein εἶναι ἐξαιρετικὰ μεγάλα. Ἄλλὰ πιστεύω ὅτι μιὰ καθαρὴ καὶ χωρὶς προκαταλήψεις κριτικὴ τῶν λαθῶν του, ὄχι μόνον ἐπιτρέπεται, ἀλλὰ εἶναι ἐντελῶς σύμφωνη μὲ τὸ πνεῦμα τοῦ ἴδιου τοῦ Einstein, πὸ σὲ πολλὰς περιπτώσεις εἶπε ὅτι δὲν μπορεῖ κανεὶς νὰ ἀνέχεται προκαταλήψεις, ὅσο ἰσχυρὲς καὶ ριζωμένες καὶ ἂν εἶναι.

Ἐνα ἐλεύθερο κριτικὸ πλησίασμα καὶ μιὰ συνεπὴς λογικὴ ἀνάλυση εἶναι ἀπαραίτητα γιὰ τὴν ὀρθὴ κατανόηση ὁποιασδήποτε φυσικῆς θεωρίας. Εἶναι ἰδιαίτερα ἀναγκαῖα γιὰ τὴν κατανόηση μιᾶς θεμελιακῆς θεωρίας, ὅπως ἡ θεωρία τοῦ Einstein. Μιὰ τέτοια θεμελιακὴ θεωρία μπορεῖ νὰ σημαίνει περισσότερα ἀπὸ τὶς προθέσεις τοῦ δημιουργοῦ της. Μιὰ θεωρία μπορεῖ,

ας ποῦμε, νὰ εἶναι περισσότερο σοφὴ ἀπὸ τὸν ἄνθρωπο ποὺ τὴ δημιούργησε.

Στὴν ἱστορία τῶν φυσικῶν ἐπιστημῶν συναντοῦμε συχνὰ καταστάσεις, ὅπου ὁ δημιουργὸς μιᾶς σπουδαίας φυσικῆς θεωρίας δὲν κατανοεῖ ὀρθὰ τὶς ἀρχές της. Μποροῦμε νὰ ἀναφέρουμε τὸν Maxwell, ποὺ σκεφτόταν μὲ μηχανιστικὲς ἔννοιες, καὶ ποὺ θεωροῦσε τὶς πεδιακὲς ἐξισώσεις τοῦ σὺν ἔκφραση τῶν νόμων τῆς παλμικῆς κίνησης ἑνὸς ἐλαστικοῦ μέσου (τοῦ αἰθέρα). Μποροῦμε ἐπίσης νὰ ἀναφέρουμε τὸν De Broglie καὶ τὸν Schrödinger, οἱ ὅποιοι σκέφτονταν μὲ ὄρους κλασικῆς πεδιακῆς θεωρίας. Μιὰ τέτοια λειψὴ κατανόηση δὲν εἶναι τόσο παράδοξη, ὅσο φαίνεται ἀπὸ πρώτη ματιὰ. Ὁ δημιουργὸς μιᾶς θεωρίας, ποὺ ἔχει καταξιωθεῖ ἀπὸ τὸ πείραμα, τείνει νὰ θεωρεῖ αὐτὴ τὴ θεωρία, ὄχι μόνον σὺν τὸ τελικὸ σημεῖο μιᾶς καθορισμένης ἀλυσίδας συλλογισμῶν, ἀλλὰ καὶ σὺν δικαίωση κάθε βήματος, κάθε κρίκου αὐτῆς τῆς ἀλυσίδας. Ἀλλὰ ὁ δρόμος πρὸς τὴν ἀνακάλυψη εἶναι κάτι τὸ ἐντελῶς διαφορετικὸ ἀπὸ μιὰ καθαρὰ λογικὴ διαδικασία. Αὐτὸ ἐκφράζεται κάλλιστα μὲ τὰ ἴδια τὰ λόγια τοῦ Einstein, «das Erfinden ist kein Werk des logischen Denkens», δηλαδή, «ἡ ἀνακάλυψη δὲν εἶναι ἀποτέλεσμα μιᾶς καθαρὰ λογικῆς συλλογιστικῆς». Εἶναι λοιπὸν πολὺ πιθανόν, μιὰ συλλογιστικὴ ποὺ ὀδήγησε σὲ μιὰ ὀρθὴ θεωρία νὰ περιέχει λογικὰ χάσματα, ἢ ἀκόμα καὶ λάθη, τὰ ὅποια ἀμαυρώνουν τὸ ἀληθινὸ νόημα τῆς θεωρίας.

Ὅταν ὁ Einstein δημιούργησε τὴ θεωρία τῆς βαρύτητας, ἡ κυρίαρχη ἰδέα του ἦταν ἡ ἰδέα τῆς «γενικῆς σχετικότητας». Εἶναι δύσκολο νὰ δοῦμε τί ἐννοῦσε μ' αὐτὸ τὸν ὄρο ὁ Einstein. Ὡστόσο μιλοῦσε γιὰ μιὰ «ἀρχὴ γενικῆς σχετικότητας», σὺν ἓνα εἶδος γενίκευσης τῆς ἀρχῆς τῆς σχετικότητας τοῦ Γαλιλαίου, ποὺ ὀνομάζεται «εἰδική» καὶ ἐφαρμόζεται στὴν ὁμοιόμορφη κίνηση. Ἴσως ὁ Einstein συσχέτιζε μὲ τὴν ἰδέα του γιὰ τὴ «γενικὴ σχετικότητα» καὶ ἄλλες φυσικὲς δυνατότητες, κι ὄχι μόνον τὴ λύση τοῦ προβλήματος τῆς σχετικῆς κίνησης. Στὶς αὐτοβιογραφικὲς σημειώσεις του μιᾶ γιὰ τὴν ἀπογοήτευσή του ὅταν ἀντιλήφθηκε ὅτι ἡ ἰδέα του γιὰ τὴ «γενικὴ σχετικότητα» κατέληξε μόνον σὲ μιὰ θεωρία τῆς βαρύτητας. (Ὁ ὄρος «σὲ τίποτα περισσότερο», ποὺ χρησιμοποιεῖ ὁ Einstein γιὰ μιὰ τόσο ὁμορφὴ θεωρία, ἀξίζει νὰ σημειωθεῖ.) Βλέπει κανεὶς πόσο προσφιλὴς ἦταν ἡ ἰδέα τῆς γενικῆς σχετικότητας στὸν Einstein.

Ἐκτὸς ἀπὸ τὴ «γενικὴ ἀρχὴ τῆς σχετικότητας», ὁ Einstein θεωροῦσε τὴν «ἀρχὴ τῆς ἰσοδυναμίας» (μὲ τὴν ἔννοια τῆς ἰσοδυναμίας ἀνάμεσα στὴ βαρύτητα καὶ τὴν ἐπιτάχυνση) ὡς συστατικὸ μέρος τῆς θεωρίας του.

Θὰ ἀναλύσουμε τὶς δυὸ αὐτὲς ἀρχές καὶ θὰ δοῦμε ἂν πράγματι μποροῦν νὰ θεωρηθοῦν ὡς τὰ θεμέλια τῆς θεωρίας τῆς βαρύτητας τοῦ Einstein. Ἡ ἀπάντησή μας θὰ εἶναι ἀρνητικὴ: θὰ καταλήξουμε στὸ συμπέρασμα ὅτι ἡ γενικὴ ἀρχὴ τῆς σχετικότητας στερεῖται φυσικοῦ νοήματος καὶ ὅτι ἡ ἀρχὴ τῆς ἰσοδυναμίας εἶναι ἀύστηρὰ τυπικὴ καὶ ἰσχύει μόνον κατὰ προσέγγιση. Τὸ πραγματικὸ θεμέλιο τῆς ὠραίας θεωρίας τῆς βαρύτητας τοῦ Einstein ἀποτελεῖται ἀπὸ ἄλλες ἀρχές.

Γιὰ νὰ ἀρχίσουμε τὴν ἔρευνά μας, πρέπει νὰ κάνουμε πρῶτα πιὸ ἀκριβὴ τὴν ἔννοια τοῦ ὄρου «ἀρχὴ τῆς σχετικότητας».

Ἡ φυσικὴ ἀρχὴ τῆς σχετικότητας βεβαιώνει τὴν ὑπαρξὴ ἀντίστοιχων διαδικασιῶν σὲ δυὸ ἐργαστήρια (συστήματα ἀναφορᾶς) σὲ σχετικὴ κίνηση τὸ ἓνα ὡς πρὸς τὸ ἄλλο. Ἐάν ἰσχύει αὐτὴ ἡ ἀρχὴ, τότε σὲ κάθε δυνατὸ φυσικὸ φαινόμενο, ποῦ συμβαίνει στὸ ἓνα ἐργαστήριο, ἀντιστοιχεῖ ἓνα ἄλλο φαινόμενο, τῆς ἴδιας φύσης, στὸ ἄλλο ἐργαστήριο. Μὲ ἄλλα λόγια, ἡ φυσικὴ ἀρχὴ τῆς σχετικότητας βεβαιώνει τὴν ταυτότητα τῶν φυσικῶν συνθηκῶν στὰ δύο ἐργαστήρια. Ἡ ἀρχὴ τῆς σχετικότητας τοῦ Γαλιλαίου, ἡ ὁποία ἰσχύει γιὰ τὴν εὐθύγραμμη καὶ ὁμοιόμορφη κίνηση, ἀντιστοιχεῖ ἀκριβῶς σ' αὐτὸν τὸν ὄρισμό. (Αὐτὸ δόθηκε πολὺ παραστατικὰ ἀπὸ τὸν ἴδιο τὸν Γαλιλαῖο, ποῦ περίγραψε φαινόμενα στὶς καμπίνες δύο πλοίων.) Ἡ ἀρχὴ σχετικότητας τῆς θεωρίας τοῦ Einstein τοῦ 1905 ἀντιστοιχεῖ καὶ σ' αὐτὸν τὸν ὄρισμό. Στὴ διατύπωση αὐτῆς τῆς ἀρχῆς ἀπὸ τὸν Einstein, λαβαίνεται ὑπόψη ἡ πεπερασμένη τιμὴ τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός (ὡς ὀριακὴ ταχύτητα) ἀλλὰ ἰσχύει, ὅπως καὶ στὴν ἀρχὴ τοῦ Γαλιλαίου, μόνο σὲ ὁμοιόμορφη σχετικὴ κίνηση δυὸ ἀδρανειακῶν συστημάτων. Ἡ μαθηματικὴ τῆς ἔκφραση εἶναι οἱ μετασχηματισμοὶ τοῦ Lorentz, τῶν ὁποίων εἰδικὴ περίπτωση εἶναι οἱ μετασχηματισμοὶ τοῦ Γαλιλαίου.

Βλέπουμε λοιπὸν ὅτι ἡ ἀρχὴ σχετικότητας τῶν Γαλιλαίου - Lorentz ἰσχύει μόνο γιὰ ἀδρανειακὰ συστήματα. Γιὰ ἐπιταχυνόμενα συστήματα ἀναφορᾶς ἡ φυσικὴ ἀρχὴ τῆς σχετικότητας δὲν ἰσχύει ἐξαιτίας τῆς διαφορᾶς τῶν φυσικῶν συνθηκῶν. Ἄς θεωρήσουμε τὸ ἀκόλουθο παράδειγμα δυὸ συστημάτων ἀναφορᾶς σὲ ἐπιταχυνόμενη κίνηση: τὴ Γῆ (τὴ γῆϊνη Σφαῖρα) καὶ τὸν Σπούτνικ (ἓναν τεχνητὸ δορυφόρο). Ἐνα ρολοὶ ποῦ κινεῖται μὲ βάρη εἶναι ἓνα πολὺ λεπτὸ ὄργανο γιὰ τὴ μέτρηση τοῦ χρόνου στὴ Γῆ, ἀλλὰ δὲν λειτουργεῖ καθόλου στὸν Σπούτνικ. Ἀκόμα περισσότερο: δὲν ὑπάρχει φαινόμενο (φυσικὴ διεργασία) πάνω σὲ κάποιο Σπούτνικ, ποῦ θὰ ἀντιστοιχοῦσε στὴν κίνηση ἑνὸς τέτοιου ρολοιοῦ πάνω στὴ Γῆ. Τὸ παράδειγμα αὐτὸ ἀρκεῖ γιὰ νὰ δείξει τὸ ἀδύνατο μιᾶς γενικῆς ἀρχῆς σχετικότητας, ὅταν αὐτὴ θεωρηθεῖ ὡς φυσικὴ ἀρχή.

Στὴ διατύπωση τῆς φυσικῆς ἀρχῆς τῆς σχετικότητας χρησιμοποίησαμε τὸν ὄρο «σύστημα ἀναφορᾶς» μὲ τὴ φυσικὴ ἔννοια (ὡς χαρακτηριστικὸ τῆς θέσης καὶ τῆς κίνησης ἑνὸς φυσικοῦ ἐργαστηρίου ὡς συνόλου). Ἀλλὰ ἀκόμα κι ἂν χρησιμοποίησουμε τὸν ὄρο «σύστημα ἀναφορᾶς», μὲ μιὰ ἔννοια περισσότερο μαθηματικὴ, ἡ ἔννοια αὐτὴ δὲν ταυτίζεται διόλου μὲ τὴν ἔννοια τοῦ συστήματος συντεταγμένων. Σὲ ἓνα καὶ τὸ αὐτὸ σύστημα ἀναφορᾶς ἀντιστοιχοῦν ἓν γένει διάφορα συστήματα συντεταγμένων.

Ἄς θεωρήσουμε τώρα τὴν ἔννοια τῆς συμμεταβλητότητας (covariance). Ἡ συμμεταβλητότητα τῶν διαφορικῶν ἐξισώσεων σὲ σχέση μὲ τοὺς μετασχηματισμοὺς συντεταγμένων χρησιμοποιεῖται πράγματι στὴ διατύπωση τῆς φυσικῆς ἀρχῆς τῆς σχετικότητας, ἀλλὰ δὲν συμπίπτει μὲ αὐτὴ τὴν ἀρχή.

Δέν είναι όλες οι ομάδες μετασχηματισμών που συνδέονται με τη φυσική σχετικότητα. Για να υπάρχει μια τέτοια σύνδεση, ο μετασχηματισμός οφείλει να επιδέχεται μια «φυσική αντίσπαθμιση». Έννοοῦμε τὴ δυνατότητα να μεταβάλουμε τις ἀρχικές συνθήκες (ἢ, γενικότερα, τις φυσικές περιστάσεις) με τρόπο ὡστε τὸ νέο φαινόμενο, ἐκφραζόμενο σε νέες συντεταγμένες, να ἔχει ἀκριβῶς τὴν ἴδια μορφή με τὸ ἀρχικό φαινόμενο στις ἀρχικές συντεταγμένες. Ἔτσι, στην περίπτωση στροφῆς τῶν ἀξόνων, μπορούμε να ἀντικαταστήσουμε τὴν κίνηση κατὰ μήκος ἑνὸς ἀπὸ τοὺς παλαιοὺς ἄξονες, με μιὰ κίνηση κατὰ μήκος τοῦ ἀντίστοιχου νέου ἄξονα. Στην περίπτωση τῶν μετασχηματισμῶν Lorentz στὴ λεγόμενη «εἰδική» θεωρία τῆς σχετικότητας, ὑποτίθεται πὼς εἶναι δυνατὴ μιὰ φυσική ἀντίσπαθμιση για ὅλα τὰ πεδία που εἰσάγονται ρητά. Ὡς πρὸς τὸ πεδίο τοῦ μετρικοῦ τανυστῆ, δέν εἶναι ἀναγκαῖα κάποια ἀντίσπαθμιση, μιὰ και οἱ συνιστώσες αὐτοῦ τοῦ τανυστῆ παραμένουν ἀμετάβλητες (ὑπάρχει μιὰ ὁμάδα κινήσεων).

Στὴν περίπτωση μετασχηματισμῶν Lorentz ἀνάμεσα στις ἀρμονικές συντεταγμένες τῆς θεωρίας τῆς βαρύτητας, ὁ μετρικός τανυστῆς δέν εἶναι ἀμετάβλητος, ἀλλὰ οἱ μεταβολές του μπορούν να ἀντισταθμιστοῦν με μιὰ ἀλλαγὴ στὴν κατανομὴ καὶ στὴν κίνηση τῶν μαζῶν. Ἔτσι γίνεται δυνατὴ μιὰ φυσική ἀντίσπαθμιση, καὶ διατηρεῖται ἡ φυσική σχετικότητα.

Στὴν περίπτωση ἀυθαίρετων μετασχηματισμῶν συντεταγμένων, γίνεται ἀδύνατη μιὰ φυσική ἀντίσπαθμιση. Τέτοιοι μετασχηματισμοὶ παύουν λοιπὸν να ἔχουν ὁποιαδήποτε σύνδεση με τὴ φυσική σχετικότητα. Ἐπομένως ἡ «γενική ἀρχὴ τῆς σχετικότητας» τοῦ Einstein (νοούμενη ὡς ἀπαίτηση γενικῆς συμμεταβλητότητας) εἶναι καθαρὰ τυπομορφική, καὶ δέν συνδέεται καθόλου με τὴ φυσική σχετικότητα. Ἡ τυπικὴ αὐτὴ ἀξίωση μπορεί να ἱκανοποιηθεῖ με κατάλληλη ἐπιλογή φορμαλισμοῦ, ὅπως οἱ λαγκρανζιανὲς ἐξισώσεις δευτέρου εἴδους, σε ὁποιαδήποτε φυσική θεωρία, ἀκόμα καὶ στὴ μὴ ρελατιβιστικὴ μηχανικὴ.

Ἄς θεωρήσουμε τώρα τὴν ἀρχὴ τῆς ἰσοδυναμίας. Ἡ ἀρχὴ αὐτὴ χρησιμοποιεῖ (ἢ, για να εἶμαστε πιὸ ἀκριβεῖς, κακομεταχειρίζεται) τὴν ἔννοια τῆς δύναμης. Ἀλλὰ ἡ ἔννοια αὐτὴ ἔχει καθορισμένο νόημα μόνο σε ἕνα ἀδρανειακὸ σύστημα ἀναφορᾶς, ὅπου μπορεί να ὀριστεῖ σύμφωνα με τὸν Νεύτωνα. Ἄν, παρ' ὅλα αὐτά, γράψουμε τις ἐξισώσεις τῆς κίνησης σ' ἕνα ἀυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων, τότε ὁ ὅρος «δύναμη» δέν μπορεί να ἐφαρμοσθεῖ σε χωριστοὺς ὅρους αὐτῶν τῶν ἐξισώσεων. Στὴν ἀντίθετη περίπτωση, ἡ ἔννοια χάνει ὁποιοδήποτε καθορισμένο νόημα. Ἔτσι ἡ λεγόμενη «φυγόκεντρη δύναμη» δέν εἶναι διόλου δύναμη. Αὐτὸς ὁ μὴ καθορισμὸς εἶναι ἡ βάση τῆς ἀρχῆς τῆς ἰσοδυναμίας τοῦ Einstein, που συμποσοῦται σε μιὰ κινηματικὴ ἐρμηνεία τῆς βαρύτητας.

Ἡ ἀρχὴ τῆς ἰσοδυναμίας ἀνάμεσα στὴν ἐπιτάχυνση καὶ τὴ βαρύτητα εἶναι καθαρὰ τυπικὴ, καὶ ἰσχύει μόνο κατὰ προσέγγιση. Μπορεῖ να εἶναι χρήσιμη (καὶ ἀποδείχτηκε χρήσιμη) για ὀρισμένες κινηματικὲς ἀναλογίες καὶ για

μερικὲς εὐρηματικὲς (heuristic) θεωρήσεις, ἀλλὰ δὲ μπορεῖ σὲ καμιά περίπτωσι νὰ ἀποτελέσει τὴ λογικὴ βάση τῆς θεωρίας τῆς βαρύτητας. Πρέπει νὰ προσθέσουμε ὅτι ἡ θεωρία τῆς βαρύτητας τοῦ Einstein δὲν εἶναι οὔτε τοπικὴ, οὔτε κινηματικὴ.

Βλέπουμε ὅτι ἂν ἡ «γενικὴ ἀρχὴ τῆς σχετικότητας» νοηθεῖ μὲ τὴ φυσικὴ ἔννοια, τότε δὲν ὑπάρχει καθόλου καὶ ἂν ἐννοοῦμε μὲ αὐτὴν τὴν τυπικὴ μαθηματικὴ ἀπαίτησι νὰ εἶναι οἱ ἐξισώσεις γενικὰ συμμεταβλητὲς, τότε δὲν εἶναι φυσικὴ. Βλέπουμε ἀκόμη ὅτι ἡ ἀρχὴ ἰσοδυναμίας εἶναι τοπικὴ καὶ κινηματικὴ. Καὶ τίθεται τὸ ἐρώτημα: Πῶς μπόρεσε ὁ Einstein νὰ θεωρήσει αὐτὲς τὶς ἀρχὲς ὡς θεμέλια τῆς θεωρίας του γιὰ τὴ βαρύτητα;

Μιὰ γενικὴ ἀπάντησι μπορεῖ νὰ βρεθεῖ στὰ λόγια τοῦ Einstein ποὺ ἤδη παραθέσαμε: «μιὰ ἀνακάλυψι δὲν εἶναι ἀποτέλεσμα καθαρὰ λογικοῦ συλλογισμοῦ». Ἡ διαίσθησι τῆς μεγαλοφυΐας μπορεῖ νὰ γεφυρώσει λογικὰ χάσματα. Ἀλλὰ ὅταν μιὰ θεωρία διατυπωθεῖ ὀριστικὰ, τὰ χάσματα αὐτὰ πρέπει νὰ ἀναλύονται καὶ νὰ ἀποφεύγονται.

Στὴν προσπάθειά του νὰ ἐφαρμόσει τὴν ἔννοια τῆς σχετικότητας σὲ μὴ-ὁμοιόμορφες κινήσεις, ὁ Einstein εἰσήγαγε σιωπηρὰ δύο οὐσιαστικὲς ἀλλαγὲς στὴν ἐρμηνεία τῶν ἐκφράσεων «σύστημα ἀναφορᾶς» καὶ «ἀρχὴ τῆς σχετικότητας» (βλέπε τὸν πίνακα).

Πίνακας

Διαφορετικὲς ἐρμηνεῖες τῆς ἔννοιας τῆς σχετικότητας

Φυσικὴ σχετικότητα = = ὑπαρξὴ ἀντίστοιχων φαινομένων = ταυτότητα φυσικῶν συνθηκῶν	σὲ δύο ἐργαστήρια
Ταυτόσημη μορφή τῶν φυσικῶν νόμων Ταυτόσημη μορφή τῶν διαφορικῶν ἐξισώσεων (πεδιακὲς ἐξισώσεις καὶ ἐξισώσεις κίνησης)	σὲ δύο συστήματα ἀναφορᾶς
Συμμεταβλητότητα τῶν διαφορικῶν ἐξισώσεων	σὲ δύο συστήματα συντεταγμένων.

Καταρχὴν ὁ Einstein ἔδωσε σιωπηρὰ ἓνα νέο νόημα στὸν ὄρο «σύστημα ἀναφορᾶς». Τὸ συνηθισμένο νόημα (στὴν προρελατιβιστικὴ φυσικὴ, καθὼς καὶ στὴ θεωρία τοῦ Einstein τοῦ 1905) ἀφορᾶ ἓνα ὑλικὸ σύστημα ἢ ἓνα ἐργαστήριο. Τὸ νέο νόημα ποὺ εἰσήγαγε ὁ Einstein ἀφορᾶ ἓνα χωροχρονικὸ σύστημα συντεταγμένων. Ἐὰν δεχθεῖ κανεὶς τὴ νέα αὐτὴ ἐρμηνεία, τότε χάνει ὁποιαδήποτε σύνδεσι μὲ τὴ φυσικὴ ἀρχὴ τῆς σχετικότητας. Ἐὰν ἐπιχειρήσει κανεὶς νὰ διατηρήσει αὐτὴ τὴ σύνδεσι, καὶ νὰ θεωρήσει ἐργαστήρια σὲ αὐθαίρετη κίνηση (ἢ ὁποία ὥστόσο σπάνια εἶναι δυνατὴ στὴ γενικὴ περί-

πτωση), τότε οφείλει να δεχτεί ότι οί φυσικές συνθήκες στα διάφορα έργαστήρια δεν είναι οί ίδιες (λ.χ., τὰ σώματα μέσα σε έναν Σπούτνικ χάνουν τὸ βάρος τους). Ἄλλὰ αὐτὴ ἡ παραδοχὴ συμποσοῦται στὴ διατύπωση ὅτι δὲν ὑπάρχει φυσικὴ σχετικότητα στὴ γενικὴ περίπτωση.

Γιὰ νὰ σώσει τὴν ἔννοια τῆς «ἀρχῆς τῆς σχετικότητας», ὁ Einstein ἄρχισε νὰ ἐρμηνεύει αὐτὸ τὸν ὄρο ὄχι μὲ φυσικό, ἀλλὰ μὲ μαθηματικὸ τρόπο. Πρῶτα τὸν ἐρμήνευσε (κάπως συγκεχυμένα) ὡς «ταυτόσημη μορφή τῶν φυσικῶν νόμων σὲ δυὸ συστήματα ἀναφορᾶς». Ὑστερα ἀντικατάστησε τοὺς φυσικοὺς νόμους μὲ διαφορικὲς ἐξισώσεις (ἐξισώσεις κίνησης καὶ πεδιακὲς ἐξισώσεις ποὺ δὲν περιλαμβάνουν ἀρχικὲς καὶ ὄριακὲς συνθήκες) καί, ἐπίσης, ἀντικατάστησε τὰ συστήματα ἀναφορᾶς μὲ συστήματα συντεταγμένων. Μ' αὐτὴ τὴν ἀλλαγὴ στὸ νόημα τῶν χρησιμοποιούμενων ὄρων, φαινόταν νὰ διατηρεῖται ἡ ἰδέα μιᾶς «γενικῆς σχετικότητας». Ἄλλὰ ὁ τελευταῖος αὐτὸς ὄρος δὲν σήμαινε, σὲ τελευταία ἀνάλυση, τίποτα περισσότερο ἀπὸ μιὰ ἀπλὴ «συμμεταβολὴ τῶν διαφορικῶν ἐξισώσεων γιὰ γενικοὺς μετασχηματισμοὺς συντεταγμένων». Καὶ ἡ ἀπαίτηση αὐτὴ ἰσοδυναμεῖ μὲ τὴ πρόταση ὅτι διαφορικὲς ἐξισώσεις [ποὺ γράφονται] μὲ διάφορες ἀνεξάρτητες μεταβλητές, πρέπει νὰ εἶναι μαθηματικὰ ἰσοδύναμες καὶ ὄχι ἀντιφατικὲς. Ἡ πρόταση αὐτὴ εἶναι ἐντελῶς προφανὴς, ἀλλὰ ἡ φύση τῆς εἶναι καθαρὰ λογικὴ καὶ δὲν ἔχει τὸ χαρακτῆρα φυσικοῦ νόμου (αὐτὸ ἀποδείχτηκε ἤδη τὸ 1929, ἀπὸ τὸν Kretschmann).

Βλέπουμε ὅτι ἡ ἀρχὴ σχετικότητας τῶν Γαλιλαίου - Lorentz ποὺ ἀποτελεῖ συστατικὸ μέρος τῆς θεωρίας τοῦ Einstein τοῦ 1905, μὲ τὶς ἀναρίθμητες φυσικὲς συνέπειές τῆς, μετατρέπεται μ' αὐτοῦ τοῦ εἴδους τὴ «γενίκευση» σὲ μιὰ καθαρὰ τυπικὴ λογικὴ ἀπαίτηση, χωρὶς ἀμεση σχέση μὲ τοὺς φυσικοὺς νόμους.

Θὰ διατυπώσουμε τὰ ἀποτελέσματά μας μὲ μιὰ σύντομη φράση: *Ἡ φυσικὴ σχετικότητα δὲν μπορεῖ νὰ εἶναι γενικὴ καὶ ἡ γενικὴ σχετικότητα δὲν μπορεῖ νὰ εἶναι φυσικὴ.*

Εἶναι πραγματικὰ τραγικὸ τὸ ὅτι ὁ Einstein δὲν δέχτηκε αὐτὸ τὸ γεγονὸς. Αὐτὸ σχετίζεται ἄμεσα μὲ τὴν ἀποτυχία ὅλων τῶν προσπαθειῶν τοῦ Einstein νὰ οἰκοδομήσει μιὰ ἐνιαία θεωρία τοῦ ἠλεκτρομαγνητικοῦ καὶ τοῦ βαρυτικοῦ πεδίου. Καὶ στὶς ἄκαρπες αὐτὲς προσπάθειες ἀφιερώθηκαν περισσότερο ἀπὸ δυὸ δεκαετίες ἀπὸ τὴν πολύτιμη ζωὴ τοῦ Einstein! Τὸ ἴδιο γεγονὸς ἐμπόδισε τὸν Einstein νὰ ἐκτιμῆσει ὀρθὰ τὶς δικές του, ὠραῖες ἐξισώσεις τῆς βαρύτητας. Ὁ τανυστὴς ὀρμῆς - ἐνέργειας, στὴ δεξιὰ μεριὰ αὐτῶν τῶν ἐξισώσεων, φάνηκε στὸν Einstein ὄχι σὰν κάτι ποὺ πραγματικὰ ἀνήκει στὴ θεωρία του, ἀλλὰ σὰν κάτι τὸ ξένο. Ὁ Einstein μάλιστα εἶπε (στὶς αὐτοβιογραφικὲς σημειώσεις του) ὅτι δὲν ἀμφέβαλε οὔτε στιγμὴ ὅτι οἱ ἐξισώσεις του μὲ τὸν τανυστὴ ὀρμῆς - ἐνέργειας ἦταν ἀπλῶς προσωρινές. Στὶς ἐρευνές του, ποὺ ἀφοροῦν τὴ συναγωγὴ τῆς ἐξίσωσης τῆς κίνησης ἀπὸ τὴν ἐξίσωση τῆς βαρύτητας, ὁ Einstein προσπάθησε νὰ μὴ χρησιμοποιήσει καθό-

λου τὸν τανυστὴ ὀρμῆς-ἐνέργειας. Αὐτὸ ὀδήγησε σ' ἓναν οὐσιαστικὸ περιορισμὸ τῶν ἀποτελεσμάτων του. Οἱ ἐξισώσεις κίνησης ποὺ πέτυχε περιορίζονταν στὴν περίπτωση σημειακῶν μαζῶν. Ἡ γενικότερη περίπτωση μαζῶν πεπερασμένου μεγέθους μὲ καθορισμένη ἐσωτερικὴ δομὴ, καὶ ὄχι κατανάγκη μὴ-περιστρεφόμενων καὶ σφαιρικῶν, ἐρευνήθηκε μόνο στὶς ἐργασίες μου καὶ στὶς ἐργασίες τῶν μαθητῶν μου.

Ὁ Einstein ἐπιχείρησε ἐπίσης νὰ θεωρήσει τὰ στοιχειώδη σωμάτια ὡς ἀνωμαλίες (singularities) κάποιου κλασικοῦ πεδίου, καὶ δὲν ἀκολούθησε τὸ δρόμο ποὺ ἄνοιξε ἡ κβαντικὴ μηχανικὴ. Θὰ ἔπρεπε νὰ σημειωθεῖ τὸ παράδοξο, ὅτι ὁ Einstein, ποὺ πρῶτος εἰσήγαγε τὴν ἔννοια τῶν φωτονίων καὶ τὶς α priori πιθανότητες στὴ φυσικὴ, δὲν ἀποδέχτηκε ποτὲ τὴν κβαντικὴ μηχανικὴ. Ὁ N. Bohr, στὶς «Συζητήσεις μὲ τὸν Einstein», γράφοντας γιὰ τὸ Συνέδριο τοῦ Solvay τὸ 1927, κάνει τὶς ἀκόλουθες ἐνδιαφέρουσες παρατηρήσεις:

«Θυμᾶμαι ἐπίσης πῶς στὸ ἀποκορύφωμα τῆς συζήτησης, ὁ Ehrenfest, μὲ τὸ συμπαθητικὸ τρόπο ποὺ εἶχε νὰ πειράζει τοὺς φίλους του, ὑπαινίχθηκε πειρακτικὰ τὴ φαινομενικὴ ὁμοιότητα ἀνάμεσα στὴ στάση τοῦ Einstein καὶ στὴ στάση τῶν ἀντίπαλων τῆς θεωρίας τῆς σχετικότητας».

Ἡ αἰτία τῆς ἀρνητικῆς στάσης τοῦ Einstein ἀπέναντι στὴν κβαντικὴ μηχανικὴ φαίνεται νὰ εἶναι ἡ μὴ ἀποδοχὴ τῆς ἰδέας τῆς «σχετικότητας ὡς πρὸς τὰ μέσα παρατήρησης», ποὺ, ὡστόσο, μπορεῖ νὰ θεωρηθεῖ σὰν μιὰ κοινὴ βάση, τόσο τῆς κβαντικῆς μηχανικῆς, ὅσο καὶ τῆς θεωρίας τῆς σχετικότητας.

Ἡ ἀντιφατικὴ στάση τοῦ Einstein στὰ θεμελιακὰ αὐτὰ προβλήματα τῆς νεότερης φυσικῆς ὀδηγεῖ στὸ συμπέρασμα πῶς βρισκόταν σὲ λανθασμένο δρόμο στὶς δυὸ ἢ, ἀκόμα, στὶς τρεῖς τελευταῖες δεκαετίες τῆς ζωῆς του.

Ἄς ἐπιστρέψουμε τώρα στὶς ἰδέες ποὺ φαίνονταν στὸν Einstein ὅτι ἀποτελοῦν τὰ θεμέλια τῆς θεωρίας του γιὰ τὴ βαρύτητα καὶ συγκεκριμένα στὴν ἰδέα τῆς γενικῆς συμμεταβλητότητας καὶ στὴν ἰδέα τῆς κινηματικῆς ἐρμηνείας τῆς βαρύτητας (στὴν «ἀρχὴ τῆς γενικῆς σχετικότητας» καὶ στὴν «ἀρχὴ τῆς ἰσοδυναμίας»). Εἶναι φανερὸ ὅτι οἱ ἰδέες αὐτὲς τὸν βοήθησαν νὰ διατυπώσει τὴ θεωρία του γιὰ τὴ βαρύτητα. Ἡ εὐρηματικὴ ἀξία τους εἶναι ἀναμφίβολη. Ποιὰ εἶναι ὅμως ἡ ἀληθινὴ θέση αὐτῶν τῶν ἰδεῶν στὴ θεωρία τῆς βαρύτητας;

Ἡ ἀπαίτηση γιὰ γενικὴ συμμεταβλητότητα εἶναι ἴσως μιὰ νύξη ἢ μιὰ ἐνδειξη τοῦ ὅτι δὲν εἶναι πάντοτε δυνατὸν νὰ θεωροῦμε κάποιο καθορισμένο σύστημα συντεταγμένων (ἢ μιὰ τάξη συστημάτων) σὰν προνομιούχο καὶ ὅτι μποροῦν νὰ ἐμφανισθοῦν περιπτώσεις (ὅπως στὸ κοσμολογικὸ πρόβλημα) ὅπου ἡ ἀπροσδιοριστία στὸ σύστημα συντεταγμένων εἶναι οὐσιαστικὴ. Ὅσο γιὰ τὴν ἀρχὴ τῆς ἰσοδυναμίας, μπορεῖ νὰ περιέχει μιὰν ἐνδειξη γιὰ τὴν ἀνάγκη ἀναζήτησης τῆς λύσης τοῦ προβλήματος τῆς βαρύτητας σὲ χρονογεωμετρικὲς θεωρήσεις. Ἴσως οἱ νύξεις αὐτὲς νὰ ἐπαιζαν κάποιο ρόλο στοὺς συλλογισμοὺς ποὺ ὀδήγησαν τὸν Einstein στὴ θεωρία του. Ἀλλὰ πιὸ οὐσια-

στική για τὸν Einstein ἦταν ἡ πεποίθηση, ὅτι ἂν μιὰ φυσικὴ θεωρία πρόκειται νὰ εἶναι ἀληθινή, ἂν ἐκφράζει ἀληθινούς νόμους τῆς φύσης, τότε πρέπει νὰ ἔχει καὶ μαθηματικὴ τελειότητα καὶ κομψότητα. Ἡ θεωρία τῆς βαρύτητας τοῦ Einstein ἱκανοποιεῖ τὴν αἰσθητικὴ αὐτὴ ἀπαίτηση μὲ λαμπρὸ τρόπο καὶ τὴν ὑποστηρίζει.

Μποροῦμε τώρα νὰ ἐκθέσουμε σύντομα τὶς ιδέες καὶ τὶς ἀρχές, ποὺ πραγματικὰ συνιστοῦν τὸ θεμέλιο τῆς θεωρίας τῆς βαρύτητας τοῦ Einstein. Στὴν πρώτη θέση ἔχουμε τὴ χρονογεωμετρικὴ ἀντίληψη, δηλαδή τὴν ἐνοποίηση τοῦ χώρου καὶ τοῦ χρόνου σὲ μιὰ τετραδιάστατη πολλαπλότητα, μὲ ἀκαθόριστη μετρικὴ. (Ἡ ιδέα αὐτὴ βρῆκε ἐπίσης τὴν ἐκφρασὴ της στὴ θεωρία τῆς σχετικότητας τοῦ 1905.) Ἔπειτα ἔχουμε τὴν ιδέα τῆς μεταβλητότητας τῆς μετρικῆς, τὴν ἀπόρριψη τοῦ ἀξιώματος τῆς ἄκαμπτης μετρικῆς. Μιὰ νύξη γι' αὐτὸ μπορεῖ νὰ βρεθεῖ στὸ ἔργο τοῦ Riemann, ἀλλὰ μόνον ὁ Einstein πέτυχε μιὰ ποσοτικὴ διατύπωση αὐτῆς τῆς ιδέας.

Σύμφωνα μὲ τὴ θεωρία τοῦ Einstein, ἡ μετρικὴ ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὶς φυσικὲς διεργασίες στὸ χῶρο καὶ στὸ χρόνο καὶ εἰδικὰ ἀπὸ τὴν κατανομὴ καὶ τὴν κίνηση τῶν μαζικῶν σωμάτων, τὰ ὁποῖα ὑπόκεινται στὶς δυνάμεις τῆς βαρύτητας. Τὸ λαμπρὸ ἐπίτευγμα τοῦ Einstein συνίσταται στὸ ὅτι ἀποκατάστησε τὴν ἐνότητα τῆς μετρικῆς καὶ τῆς βαρύτητας. Ἡ ἐνότητα αὐτὴ ἐκφράζεται τυπικὰ μὲ τὸ ἀξίωμα ὅτι, τόσο ἡ μετρικὴ, ὅσο καὶ ἡ βαρύτητα ἐκφράζονται μὲ τὸ ἴδιο σύνολο ποσοτήτων — τὸ μετρικὸ τανυστὴ. Ἡ σύνδεση ἀνάμεσα στὸ μετρικὸ τανυστὴ καὶ στὴν κατανομὴ τῶν μαζῶν (τὸν τανυστὴ ὀρμῆς-ἐνέργειας) δίνεται ἀπὸ τὶς γνωστὲς ἐξισώσεις τῆς βαρύτητας τοῦ Einstein, ποὺ πρέπει νὰ θεωρηθοῦν σὰν ἓνα ἀπὸ τὰ μεγαλύτερα ἐπιτεύγματα τῆς ἀνθρώπινης διάνοιας.

Μποροῦμε λοιπὸν νὰ δοῦμε τὴ θεωρία τοῦ Einstein σὰν ἐκφραση τῆς ἀρχῆς τῆς ἐνότητας ἀνάμεσα στὴ μετρικὴ καὶ στὴ βαρύτητα. Ὅσο γιὰ τὶς ἀρχές τῆς σχετικότητας καὶ τῆς ἰσοδυναμίας, εἶναι, τὸ πολὺ, χρήσιμες νύξεις, ποὺ ὑποδείχνουν πιθανοὺς δρόμους γιὰ τὴ θεωρία.

Ἐπιστρέφουμε τώρα στὸ ζήτημα τῆς φυσικῆς σχετικότητας. Εἶναι φανερὸ (καὶ τὸ ἐκθέσαμε προηγουμένα) ὅτι ἡ φυσικὴ σχετικότητα δὲν μπορεῖ νὰ εἶναι γενικὴ. Ἀλλὰ ἀκόμα καὶ στὴ θεωρία τῆς βαρύτητας τοῦ Einstein, ἡ ὁποία λειτουργεῖ μὲ μὴ ὁμοιόμορφο χωρόχρονο, ἡ φυσικὴ σχετικότητα, ὅπως ἐκφράζεται ἀπὸ τοὺς μετασχηματισμοὺς τοῦ Lorentz, εἶναι ἀκόμα δυνατὴ σὲ μερικὲς περιπτώσεις. Αὐτὸ ὀφείλεται στὴν ἀπόρριψη τοῦ ἀξιώματος τῆς ἄκαμπτης μετρικῆς. Γιὰ μιὰ ἄκαμπτη μετρικὴ ἡ φυσικὴ σχετικότητα εἶναι δυνατὴ μόνο σὲ ἐπίπεδο χῶρο (ἢ σὲ χῶρο μὲ σταθερὴ καμπυλότητα). Στὴν περίπτωση μεταβλητῆς μετρικῆς, ἡ κατάσταση εἶναι διαφορετικὴ. Στὴν περίπτωση αὐτὴ ὑπάρχουν μετασχηματισμοὶ συντεταγμένων ποὺ ἀντιστοιχοῦν στὴν κίνηση μὲ βάση τὴ φυσικὴ σχετικότητα, μιὰ καὶ ἡ ἀλλαγὴ στὸ μετρικὸ τανυστὴ, ποὺ προκύπτει ἀπὸ τέτοιους μετασχηματισμοὺς, μπορεῖ νὰ ἀντισταθμιστεῖ μὲ μιὰ προσαρμογὴ τῶν φυσικῶν συνθηκῶν.

Γιὰ νὰ πάρουμε ἓνα ἀπλό παράδειγμα μιᾶς τέτοιας προσαρμογῆς, ἄς θεωρήσουμε δυὸ ἐργαστήρια στὴν ἐπιφάνεια τῆς Γῆς. Ἐκεῖ ὁ χῶρος δὲν εἶναι ἰσότροπος: ὀφείλει κανεὶς νὰ διακρίνει ἀνάμεσα στὶς δύο διευθύνσεις «πάνω» καὶ «κάτω». Ἔτσι, ἂν βάλουμε τὸ ἓνα ἐργαστήριο μὲ τὸ πάτωμα πρὸς τὰ πάνω, οἱ συνθῆκες στὸ ἐσωτερικὸ του θὰ ἀλλάξουν ὀλοκληρωτικά. Ἀλλὰ ἂν μεταφέρουμε προσεκτικὰ τὸ ἐργαστήριο αὐτὸ στοὺς ἀντίποδες, τότε οἱ φυσικὲς συνθῆκες στὸ ἐσωτερικὸ του θὰ εἶναι ἀκριβῶς οἱ ἴδιες μὲ ἐκεῖνες τοῦ ἐργαστηρίου ποὺ διατήρησε τὴν ἀρχικὴ του θέση, παρὰ τὸ γεγονὸς ὅτι τὸ δεύτερο αὐτὸ ἐργαστήριο εἶναι τώρα ἀντιπαράλληλο σὲ σχέση μὲ τὸ πρῶτο. Συνεπῶς ἡ φυσικὴ ἀρχὴ τῆς σχετικότητας, σὲ σχέση μὲ τὴ στροφὴ τῶν ἀξόνων, ἰσχύει ἀκόμα.

Στὴν περίπτωση μιᾶς κατανομῆς τῶν μαζῶν σὲ νησίδες, ὅπως ἡ κατανομὴ στὸ ἡλιακὸ σύστημα, ἡ φυσικὴ σχετικότητα ὑπάρχει πάντα. Ἐκφράζεται ἀπλούστερα μὲ βάση τὶς ἀρμονικὲς συντεταγμένες, ποὺ μποροῦν νὰ εἰσαχθοῦν σ' αὐτὴ τὴν περίπτωση. Οἱ ἀρμονικὲς συντεταγμένες ὀρίζονται μὲ τὴ βοήθεια τῆς κυματικῆς ἐξίσωσης μὲ ὀριακὲς συνθῆκες στὸ ἄπειρο (εὐκλείδειος χαρακτήρας τοῦ χῶρου καὶ ἀπουσία εἰσερχόμενων κυμάτων). Ἡ σύνδεση ἀνάμεσα σὲ δύο συστήματα ἀναφορᾶς, γιὰ τὰ ὁποῖα ἰσχύει ἡ ἀρχὴ τῆς φυσικῆς σχετικότητας, ἐκφράζεται μὲ μιὰ γραμμικὴ σχέση (συγκεκριμένα, μὲ ἓνα μετασχηματισμὸ Lorentz) ἀνάμεσα στὶς ἀρμονικὲς συντεταγμένες (ὁ μετασχηματισμὸς πρέπει νὰ συνοδεύεται ἀπὸ μιὰ κατάλληλη ἀλλαγὴ στὴν κατανομὴ τῶν μαζῶν.)

Οἱ ἀρμονικὲς συντεταγμένες μπορεῖ νὰ θεωρηθοῦν σὰν προνομιακὲς, μὲ τὴν ἔννοια ὅτι εἶναι οἱ μόνες, γιὰ τὶς ὁποῖες ἡ φυσικὴ σχετικότητα ἐκφράζεται μὲ γραμμικοὺς μετασχηματισμοὺς. Δὲν εἶναι βέβαια περισσότερο (ἀλλὰ οὔτε καὶ λιγότερο) προνομιοῦχος ἀπὸ τὶς συντεταγμένες τοῦ Γαλιλαίου στὴ λεγόμενη εἰδικὴ θεωρία τῆς σχετικότητας, τῶν ὁποίων εἶναι τὸ πλησιέστερο ἀνάλογο. Ἀπὸ πρακτικὴ ἄποψη εἶναι περισσότερο βολικὲς, μιὰ καὶ ἡ χρησιμοποίησή τους διευκολύνει ἀφάνταστα τοὺς ὑπολογισμοὺς.

Ὅπως ἀναφέρθηκε προηγουμένως, γιὰ νὰ ὑπάρχουν οἱ ἀρμονικὲς συντεταγμένες, θὰ πρέπει νὰ ἰσχύουν εἰδικὲς συνθῆκες ὅσον ἀφορᾶ τὴν κατανομὴ τῶν μαζῶν. Εἶναι ὥστόσο δυνατὲς ἰδανικὲς περιπτώσεις (ὅπως ἡ περίπτωση τοῦ χῶρου τοῦ Friedmann), ὅταν ὀρισμένα συστήματα συντεταγμένων διακρίνονται ἀπὸ ἄλλα, χάρις στὶς εἰδικὲς ιδιότητές τους.

Θὰ πρέπει νὰ σημειωθεῖ ὅτι ἡ ὑπαρξὴ ἀρμονικῶν συντεταγμένων εἶναι ἓνα ὀλοκληρωτικὸ (σὲ ἀντιπαράβολη μὲ τὸ τοπικὸ) χαρακτηριστικὸ τοῦ χωρόχρονου. Γιὰ νὰ τὶς ἔχουμε, πρέπει νὰ ὀλοκληρωθοῦν διαφορικὲς ἐξισώσεις μὲ ὀριακὲς συνθῆκες. Σὲ σχέση μ' αὐτὸ μπορεῖ νὰ γίνῃ μιὰ γενικὴ παρατήρηση, δηλαδή, ὅτι τὰ ὀλοκληρωτικὰ χαρακτηριστικὰ δὲν εἶναι λιγότερο σπουδαῖα ἀπὸ τὰ τυπικὰ (δηλ. ἀπ' αὐτὰ ποὺ ἰσχύουν σὲ μιὰ ἀπειροστή περιοχὴ, ἢ ποὺ ἔχουν τὴ μορφή διαφορικῶν ἐξισώσεων). Ἀκόμη, δὲν

Θὰ ἦταν ὀρθὸ νὰ δεχτοῦμε ὅτι ὅλοι οἱ φυσικοὶ νόμοι μποροῦν νὰ ἀναχθοῦν σὲ τανυστικὲς σχέσεις.

Συμπερασματικά, θὰ ἤθελα νὰ τονίσω, μὲ ὅλη τὴ δυνατὴ ἔμφαση, ὅτι μιὰ ἐλεύθερη καὶ χωρὶς προκαταλήψεις κριτικὴ τῆς ωραίας χρονογεωμετρικῆς θεωρίας τῆς βαρύτητας, ποὺ δημιουργήθηκε ἀπὸ τὸν Einstein, μπορεῖ νὰ συμβάλει σὲ μιὰ ἀποσαφήνιση τῶν ἀρχῶν της, καὶ δὲν εἰσάγει ὅποιαδήποτε ἀμφιβολία ὡς πρὸς τὴν ἰσχὺ της. Ἐλπίζω λοιπὸν ὅτι ὁ κριτικὸς χαρακτήρας τοῦ κειμένου μου δὲν θὰ ἐρμηνευθεῖ σὰν ἓνα εἶδος μὴ-ἀποδοχῆς τῆς θεωρίας τοῦ Einstein, ἢ σὰν ὑποτίμηση τῶν ἐπιτευγμάτων του. Ὁ Einstein εἶναι ἀναμφισβήτητα ἓνα ἀπὸ τὰ μεγαλύτερα ἐπιστημονικὰ πνεύματα στὴν ἱστορία τῆς ἀνθρωπότητας καὶ ἡ θεωρία του γιὰ τὴ βαρύτητα εἶναι τὸ μεγαλύτερο ἐπίτευγμά του.

Μετάφραση: Γ. Λογοθέτης