

Γενικές αρχές της θεωρίας της βαρύτητας του Αϊνστάιν*

Το χρόνο που πέρασε –το 1966– πολλές ημερομηνίες συνδέθηκαν με το όνομα του Αϊνστάιν: η 10η επέτειος του θανάτου του, η 60ή επέτειος της θεωρίας της σχετικότητας (που συνήθως ονομάζεται «ειδική») και η 50ή επέτειος της θεωρίας του για τη βαρύτητα: τον Νοέμβριο του 1915 ο Αϊνστάιν έκανε την πρώτη ανακοίνωση πάνω σ' αυτό το θέμα στην Ακαδημία Επιστημών του Βερολίνου.

Η θεωρία της βαρύτητας του Αϊνστάιν είναι μια θεωρία εντυπωσιακής τελειότητας και ομορφιάς. Συμφωνεί με την παρατήρηση σε όλες τις περιπτώσεις που επιδέχεται πειραματική επαλήθευση. Ανοίγει απεριόριστους ορίζοντες για τη γνώση του σύμπαντος. Η θεωρία του Αϊνστάιν είναι επίσης θεωρία της βαρύτητας και θεωρία του χωροχρόνου: μπορεί κάλλιστα να ονομαστεί *χρονογεωμετρική θεωρία της βαρύτητας*.

Ωστόσο το παραδοσιακό της όνομα δεν είναι θεωρία της βαρύτητας αλλά «γενική θεωρία της σχετικότητας». Η ονομασία αυτή είναι εντελώς ακατάλληλη και παραπλανητική. Είναι λοιπόν ανάγκη να κάνουμε μερικές παρατηρήσεις σχετικά με το όνομα της θεωρίας.

Η θεωρία του Αϊνστάιν του 1905 –η λεγόμενη ειδική θεωρία της σχετικότητας– είναι, όπως και η θεωρία του 1915, μια θεωρία του χώρου και του χρόνου, και η ονομασία «χρονογεωμετρία», που προτάθηκε από τον Δανό φυσικό Fokker, χαρακτηρίζει την ουσία της θεωρίας πολύ καλύτερα απ' ό,τι το παραδοσιακό «θεωρία της σχετικότητας». Είναι αλήθεια ότι η αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου, που αφορά την ομοιόμορφη κίνηση, παίζει ουσιαστικό ρόλο

* Το κείμενο αυτό του μεγάλου Σοβιετικού φυσικού παρουσιάστηκε σε σεμινάριο στο Institut Poincaré, στο Παρίσι, το 1966. Δόθηκε στον Ε. Μπιτσάκη για δημοσίευση στο περιοδικό *Σύγχρονα θέματα*, το οποίο αναγκάστηκε να διακόψει την έκδοσή του με την έλευση της δικτατορίας. Δημοσιεύτηκε «εξ επαγωγής» με την άδεια του συγγραφέα στο περιοδικό *Δευκαλίων*, απ' όπου και αναδημοσιεύεται στην *Ουτοπία*. Τίτλος του πρωτοτύπου: *General Principles of Einstein's Gravitation Theory*. Το κείμενο του Vladimir Fock φωτίζει από διαφορετική άποψη τη φυσική σημασία της θεωρίας του Αϊνστάιν.

σ' αυτή τη θεωρία. (Εννοώ τη γενικευμένη διατύπωση αυτής της αρχής, όπως εκφράζεται από τους σχηματισμούς του Λόρεντς, στους οποίους λαμβάνεται υπ' όψιν η πεπερασμένη τιμή της ταχύτητας του φωτός.) Αυτό δικαιολογεί ως ένα βαθμό την ονομασία «θεωρία της σχετικότητας» (χωρίς ωστόσο το επίθετο «ειδική») μια και οι μετασχηματισμοί του Λόρεντς είναι οι πιο γενικοί μετασχηματισμοί που εκφράζουν την έννοια της σχετικότητας στο χωροχρόνο). Αλλά η ουσία της θεωρίας της σχετικότητας βρίσκεται στα αξιώματα που αφορούν τις ιδιότητες του χώρου και χρόνου, και τα αξιώματα αυτά έχουν απόλυτο χαρακτήρα. Βεβαιώνουν καταρχήν την ύπαρξη μιας οριακής ταχύτητας για τη διάδοση οποιασδήποτε μορφής δράσης και, κατά δεύτερο λόγο, την ομοιομορφία του χώρου και του χρόνου.

Ωστόσο το θέμα της ανακοίνωσής μου δεν είναι η θεωρία του Αϊνστάιν του 1905 αλλά η θεωρία του 1915 –η θεωρία του για τη βαρύτητα– και η ονομασία «γενική σχετικότητα» είναι ακόμα πιο παραπλανητική από την ονομασία «σχετικότητα» για τη θεωρία του 1905. Κι αυτό επειδή η έννοια της σχετικότητας δεν γενικεύεται αλλά περιορίζεται στη λεγόμενη «γενική» θεωρία. Αυτό που γενικεύεται δεν είναι η έννοια αυτή, αλλά η έννοια της γεωμετρίας.

Μπορεί κανείς να ρωτήσει: είναι ανάγκη να δίνεται τόση προσοχή στο όνομα μιας φυσικής θεωρίας; Το όνομα, έστω και ακατάλληλο, δεν αλλάζει τίποτα. Δεν μπορώ να συμφωνήσω με αυτή την αντίρρηση. Το όνομα μιας θεωρίας, ή γενικά μιας ανακάλυψης, ενέχει συχνά μια ερμηνεία της θεωρίας ή της ανακάλυψης. Ένα ακατάλληλο όνομα αντανακλά μια λανθασμένη ερμηνεία. Τέτοιο είναι το όνομα «Δυτικές Ινδίες», που έδωσε ο Κολόμβος στα νησιά που βρίσκονται κοντά στην αμερικανική ήπειρο· αυτό οφείλεται σε σφάλμα του εξερευνητή. Αλλά ενώ κανείς δεν ισχυρίζεται ότι οι Δυτικές Ινδίες είναι το δυτικό τμήμα των Ινδιών, πολλοί έχουν τη γνώμη ότι η γενική σχετικότητα γενικεύει την έννοια της σχετικότητας. Για να αποφύγουμε μια τέτοια παρανόηση, είναι ανάγκη να είμαστε πιο προσεκτικοί με τις ονομασίες. Θα ονομάσω λοιπόν τη θεωρία του Αϊνστάιν «χρονογεωμετρική θεωρία της βαρύτητας», ή απλώς «θεωρία της βαρύτητας».

Χρησιμοποίησα τη λέξη «σφάλμα του εξερευνητή» και τόλμησα να συσχετίσω αυτές τις λέξεις με τον Αϊνστάιν. Αυτό είναι δυνατόν να προκαλέσει διαμαρτυρίες. Μπορεί να πει κανείς: επιτρέπονται οι επικρίσεις; Δεν είναι μια μεγαλοφυΐα, πέρα από κάθε κριτική;

Δεν είμαι σύμφωνος με αυτή την άποψη. Είμαι εναντίον κάθε λατρείας του προσώπου του και δεν αποδέχομαι το δόγμα πως δεν μπορεί να κάνει λάθη. Τα επιστημονικά επιτεύγματα του Αϊνστάιν είναι εξαιρετικά μεγάλα. Αλλά πιστεύω ότι μια καθαρή και χωρίς προκαταλήψεις κριτική των λαθών του όχι μόνο επιτρέπεται αλλά είναι και εντελώς σύμφωνη με το πνεύμα του ίδιου του Αϊνστάιν,

που σε πολλές περιπτώσεις είπε ότι δεν μπορεί κανείς να ανέχεται προκαταλήψεις, όσο ισχυρές και ριζωμένες κι αν είναι.

Μια ελεύθερη κριτική και μια συνεπής λογική ανάλυση είναι προσεγγίσεις απαραίτητες για την ορθή κατανόηση οποιασδήποτε φυσικής θεωρίας. Είναι ιδιαίτερα αναγκαίες για την κατανόηση μιας θεμελιακής θεωρίας όπως η θεωρία του Αϊνστάιν. Μια τέτοια θεμελιακή θεωρία μπορεί να σημαίνει περισσότερα από τις προθέσεις του δημιουργού της. Μια θεωρία μπορεί, ας πούμε, να είναι περισσότερο σοφή από τον άνθρωπο που τη δημιούργησε.

Στην ιστορία των φυσικών επιστημών συναντούμε συχνά καταστάσεις όπου ο δημιουργός μιας σπουδαίας φυσικής θεωρίας δεν κατανοεί ορθά τις αρχές της. Μπορούμε να αναφέρουμε τον Μάξγουελ, που σκεφτόταν με μηχανιστικές έννοιες, και που θεωρούμε τις πεδιακές εξισώσεις του έκφραση των νόμων της παλμικής κίνησης ενός ελαστικού μέσου (του αιθέρα). Μπορούμε επίσης να αναφέρουμε τον ντε Μπρόλι και τον Σρέντιγκερ, οι οποίοι σκέφτονταν με όρους κλασικής πεδιακής θεωρίας. Μια τέτοια λειπή κατανόηση δεν είναι τόσο παράδοξη, όσο φαίνεται από πρώτη ματιά. Ο δημιουργός μιας θεωρίας που έχει καταξιωθεί από το πείραμα τείνει να τη θεωρεί όχι μόνο τελικό σημείο μιας καθορισμένης αλυσίδας συλλογισμών, αλλά και δικαίωση κάθε βήματος, κάθε κρίκου αυτής της αλυσίδας. Ωστόσο ο δρόμος προς την ανακάλυψη είναι κάτι εντελώς διαφορετικό από μια καθαρή διαδικασία. Αυτό εκφράζεται κάλλιστα με τα ίδια τα λόγια του Αϊνστάιν «das Erfinden ist kein Werk des logischen Denkens», δηλαδή «η ανακάλυψη δεν είναι αποτέλεσμα μιας καθαρά λογικής συλλογιστικής». Είναι λοιπόν πολύ πιθανό μια συλλογιστική που οδήγησε σε ορθή θεωρία να περιέχει λογικά χάσματα, ή ακόμα και λάθη, τα οποία αμαυρώνουν το αληθινό νόημα της θεωρίας.

Όταν ο Αϊνστάιν δημιούργησε τη θεωρία της βαρύτητας, η κυρίαρχη ιδέα του ήταν η ιδέα της «γενικής σχετικότητας». Είναι δύσκολο να δούμε τι εννοούσε με αυτό τον όρο ο Αϊνστάιν. Ωστόσο, μιλούσε για μια «αρχή γενικής σχετικότητας», σαν ένα είδος γενίκευσης της αρχής της σχετικότητας του Γαλιλαίου, που ονομάζεται «ειδική» και εφαρμόζεται στην ομοιόμορφη κίνηση. Ίσως ο Αϊνστάιν συσχέτιζε την ιδέα του για τη «γενική σχετικότητα» και άλλες φυσικές δυνατότητες, κι όχι μόνο τη λύση του προβλήματος της σχετικής κίνησης. Στις αυτοβιογραφικές σημειώσεις του μιλά για την απογοήτευσή του όταν αντιλήφθηκε ότι η ιδέα του για τη «γενική σχετικότητα» κατέληξε μόνο σε μια θεωρία της βαρύτητας. (Αξίζει να σημειωθεί ο όρος «σε τίποτα περισσότερο», που χρησιμοποιεί ο Αϊνστάιν για μια τόσο όμορφη θεωρία.) Βλέπει κανείς πόσο προσφιλής ήταν η ιδέα της γενικής σχετικότητας του Αϊνστάιν.

Εκτός από τη «γενική αρχή της σχετικότητας», ο Αϊνστάιν θεωρούσε την «αρχή της ισοδυναμίας» (με την έννοια της ισοδυναμίας ανάμεσα στη βαρύτητα και την επιτάχυνση) ως συστατικό μέρος της θεωρίας του.

Θα αναλύσουμε τις δύο αυτές αρχές και θα δούμε αν πράγματι μπορούν να θεωρηθούν θεμέλια της θεωρίας της βαρύτητας του Αϊνστάιν. Η απάντησή μας θα είναι αρνητική: θα καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η γενική αρχή της σχετικότητας στερείται φυσικού νοήματος και ότι η αρχή της ισοδυναμίας είναι αυστηρά τυπική και ισχύει μόνο κατά προσέγγιση. Το πραγματικό θεμέλιο της κλασικής θεωρίας του Αϊνστάιν αποτελείται από άλλες αρχές.

Για να αρχίσουμε την έρευνά μας, πρέπει πρώτα να κάνουμε ακριβέστερη την έννοια του όρου «αρχή της σχετικότητας».

Η φυσική αρχή της σχετικότητας βεβαιώνει την ύπαρξη αντίστοιχων διαδικασιών σε δυο εργαστήρια (συστήματα αναφοράς) σε σχετική κίνηση το ένα ως προς το άλλο. Αν ισχύει αυτή η αρχή, τότε σε κάθε δυνατό φυσικό φαινόμενο που συμβαίνει στο ένα εργαστήριο αντιστοιχεί ένα άλλο φαινόμενο της ίδιας φύσης στο άλλο εργαστήριο. Με άλλα λόγια, η φυσική αρχή της σχετικότητας βεβαιώνει την ταυτότητα των φυσικών συνθηκών στα δύο εργαστήρια. Η αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου, η οποία ισχύει για την ευθύγραμμη και ομοιόμορφη κίνηση, αντιστοιχεί ακριβώς σ' αυτό τον ορισμό. (Αυτό δόθηκε πολύ παραστατικά από τον ίδιο τον Γαλιλαίο, που περιέγραψε φαινόμενα στις καμπίνες δύο πλοίων.) Η αρχή σχετικότητας της θεωρίας του Αϊνστάιν το 1905 αντιστοιχεί και σ' αυτόν τον ορισμό. Στη διατύπωση αυτής της αρχής από τον Αϊνστάιν λαμβάνεται υπ' όψιν η πεπερασμένη τιμή της ταχύτητας του φωτός (ως οριακή ταχύτητα) αλλά ισχύει, όπως και στην αρχή του Γαλιλαίου, μόνο σε ομοιομορφική σχετική κίνηση δύο αδρανειακών συστημάτων. Η μαθηματική της έκφραση είναι οι μετασχηματισμοί του Λόρεντς, των οποίων ειδική περίπτωση είναι οι μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου.

Βλέπουμε λοιπόν ότι η αρχή σχετικότητας των Γαλιλαίου – Λόρεντς ισχύει μόνο για αδρανειακά συστήματα. Για επιταχυνόμενα συστήματα αναφοράς, η φυσική αρχή της σχετικότητας δεν ισχύει εξαιτίας της διαφοράς των φυσικών συνθηκών. Ας θεωρήσουμε το ακόλουθο παράδειγμα δύο συστημάτων αναφοράς σε επιταχυνόμενη κίνηση: τη Γη (τη γήινη σφαίρα) και τον Σπούτνικ (έναν τεχνητό δορυφόρο). Ένα ρολόι που κινείται με βάρη είναι ένα πολύ λεπτό όργανο για τη μέτρηση του χρόνου στη Γη, αλλά δεν λειτουργεί καθόλου στον Σπούτνικ. Ακόμα περισσότερο: δεν υπάρχει φαινόμενο (φυσική διεργασία) πάνω σε κάποιον Σπούτνικ, που θα αντιστοιχούσε στην κίνηση ενός τέτοιου ρολογιού πάνω στη Γη. Το παράδειγμα αυτό αρκεί για να δείξει το αδύνατο μιας γενικής αρχής σχετικότητας, όταν αυτή θεωρηθεί φυσική αρχή.

Στη διατύπωση της φυσικής αρχής της σχετικότητας χρησιμοποιήσαμε τον όρο «σύστημα αναφοράς» με τη φυσική έννοια (ως χαρακτηριστικό της θέσης και της κίνησης ενός φυσικού εργαστηρίου ως συνόλου). Αλλά ακόμα κι αν χρησιμοποιήσουμε τον όρο «σύστημα αναφοράς» με περισσότερο μαθηματική έννοια,

η έννοια αυτή δεν ταυτίζεται διόλου με την έννοια του συστήματος συντεταγμένων. Σε ένα και το αυτό σύστημα αναφοράς αντιστοιχούν εν γένει διάφορα συστήματα συντεταγμένων.

Ας θεωρήσουμε τώρα την έννοια της συμμεταβλητότητας (covariance). Η συμμεταβλητότητα των διαφορικών εξισώσεων σε σχέση με τους μετασχηματισμούς συντεταγμένων χρησιμοποιείται πράγματι στη διατύπωση της φυσικής αρχής της σχετικότητας, αλλά δεν συμπίπτει με αυτή την αρχή.

Δεν είναι όλες οι ομάδες μετασχηματισμών που συνδέονται με τη φυσική σχετικότητα. Για να υπάρχει μια τέτοια σύνδεση, ο μετασχηματισμός οφείλει να επιδέχεται «φυσική αντιστάθμιση». Εννοούμε τη δυνατότητα να μεταβάλουμε τις αρχικές συνθήκες (ή γενικότερα τις φυσικές περιστάσεις) με τρόπο ώστε το νέο φαινόμενο, εκφραζόμενο σε νέες συντεταγμένες, να έχει ακριβώς την ίδια μορφή με το αρχικό φαινόμενο στις αρχικές συντεταγμένες. Έτσι, στην περίπτωση στροφής των αξόνων, μπορούμε να αντικαταστήσουμε την κίνηση κατά μήκος ενός από τους παλαιούς άξονες, με μια κίνηση κατά μήκος του αντίστοιχου νέου άξονα. Στην περίπτωση των μετασχηματισμών Λόρεντς, στη λεγόμενη «ειδική» θεωρία της σχετικότητας, υποτίθεται πως είναι δυνατή μια φυσική αντιστάθμιση για όλα τα πεδία που εισάγονται ρητά. Ως προς το πεδίο του μετρικού ταυυστή, δεν είναι αναγκαία κάποια αντιστάθμιση, εφόσον οι συνιστώσες αυτού του ταυυστή παραμένουν αμετάβλητες (υπάρχει μια ομάδα κινήσεων).

Στην περίπτωση μετασχηματισμών Λόρεντς ανάμεσα στις αρμονικές συντεταγμένες της θεωρίας της βαρύτητας, ο μετρικός ταυυστής δεν είναι αμετάβλητος, αλλά οι μεταβολές του μπορούν να αντισταθμιστούν σε μια αλλαγή στην κατανομή και στην κίνηση των μαζών. Έτσι γίνεται δυνατή μια φυσική αντιστάθμιση και διατηρείται η φυσική σχετικότητα.

Στην περίπτωση αυθαίρετων μετασχηματισμών συντεταγμένων γίνεται αδύνατη μια φυσική αντιστάθμιση. Τέτοιοι μετασχηματισμοί παύουν λοιπόν να έχουν οποιαδήποτε σύνδεση με τη φυσική σχετικότητα. Επομένως η «γενική αρχή της σχετικότητας» του Αϊνστάιν (νοούμενη ως απαίτηση γενικής συμμεταβλητότητας) είναι καθαρά τυπομορφική, και δεν συνδέεται καθόλου με τη φυσική σχετικότητα. Η τυπική αυτή αξίωση μπορεί να ικανοποιηθεί με κατάλληλη επιλογή φορμαλισμού, όπως οι λαγκρανζιανές εξισώσεις δευτέρου είδους, σε οποιαδήποτε φυσική θεωρία, ακόμα και στη μη σχετικιστική μηχανική.

Ας θεωρήσουμε τώρα την αρχή της ισοδυναμίας. Η αρχή αυτή χρησιμοποιεί (ή, για να είμαστε ακριβείς, κακομεταχειρίζεται) την έννοια της δύναμης. Αλλά η έννοια αυτή έχει καθορισμένο νόημα μόνο σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, όπου μπορεί να οριστεί σύμφωνα με τον Νεύτωνα. Αν, παρ' όλ' αυτά, γράψουμε τις εξισώσεις της κίνησης σ' ένα αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων, τότε ο όρος «δύναμη» δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε χωριστούς όρους αυτών των

εξισώσεων. Στην αντίθετη περίπτωση, η έννοια χάνει οποιοδήποτε καθορισμένο νόημα. Έτσι, η λεγόμενη «φυγόκεντρος δύναμη» δεν είναι διόλου δύναμη. Αυτός ο μη καθορισμός είναι η βάση της αρχής της ισοδυναμίας του Αϊνστάιν, που συμποσούται σε μια κινηματική ερμηνεία της βαρύτητας.

Η αρχή της ισοδυναμίας ανάμεσα στην επιτάχυνση και τη βαρύτητα είναι καθαρά τυπική, και ισχύει μόνο κατά προσέγγιση. Μπορεί να είναι χρήσιμη (και αποδεκτή ως χρήσιμη) για ορισμένες κινηματικές αναλογίες και για μερικές ευρηματικές (heuristic) θεωρήσεις, αλλά δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να αποτελέσει τη λογική βάση της θεωρίας της βαρύτητας. Πρέπει να προσθέσουμε ότι η θεωρία της βαρύτητας του Αϊνστάιν δεν είναι ούτε τοπική ούτε κινηματική.

Βλέπουμε ότι, αν η «γενική αρχή της σχετικότητας» νοηθεί με τη φυσική έννοια, τότε δεν υπάρχει καθόλου, και αν εννοούμε με αυτή την τυπική μαθηματική απαίτηση να είναι οι εξισώσεις γενικά συμμεταβλητές, τότε δεν είναι φυσική. Βλέπουμε ακόμη ότι η αρχή ισοδυναμίας είναι τοπική και κινηματική. Και τίθεται το ερώτημα: Πώς μπόρεσε ο Αϊνστάιν να θεωρήσει αυτές τις αρχές θεμέλια της θεωρίας του για τη βαρύτητα;

Μια γενική απάντηση μπορεί να βρεθεί στα λόγια του Αϊνστάιν που ήδη παραθέσαμε: «Μια ανακάλυψη δεν είναι αποτέλεσμα καθαρά λογικού συλλογισμού». Η διαίσθηση μιας μεγαλοφυΐας μπορεί να γεφυρώσει λογικά χάσματα. Αλλά, όταν μια θεωρία διατυπωθεί οριστικά, τα χάσματα αυτά πρέπει να αναλύονται και να αποφεύγονται.

Στην προσπάθειά του να εφαρμόσει την έννοια της σχετικότητας σε μη ομοιόμορφες κινήσεις, ο Αϊνστάιν εισήγαγε σιωπηρά δυο ουσιαστικές αλλαγές στην ερμηνεία των εκφράσεων «σύστημα αναφοράς» και «αρχή της σχετικότητας» (βλ. πίνακα).

Καταρχήν ο Αϊνστάιν έδωσε σιωπηρά νέο νόημα στον όρο «σύστημα αναφοράς». Το συνηθισμένο νόημα (στην προσχετικιστική φυσική καθώς και στη θεωρία του Αϊνστάιν του 1905) αφορά ένα υλικό σύστημα ή ένα εργαστήριο. Το νέο νόημα που εισήγαγε ο Αϊνστάιν αφορά ένα χωροχρονικό σύστημα συντεταγμένων. Αν δεχτεί κανείς τη νέα αυτή ερμηνεία, τότε χάνει οποιαδήποτε σύνδεση με τη φυσική αρχή της σχετικότητας. Αν επιχειρήσει καιείς να διατηρήσει αυτή τη σύνδεση, και να θεωρήσει εργαστήρια σε αυθαίρετη κίνηση (η οποία ωστόσο σπάνια είναι δυνατή στη γενική περίπτωση), τότε οφείλει να δεχτεί ότι οι φυσικές συνθήκες στα διάφορα εργαστήρια δεν είναι οι ίδιες (λ. χ. τα σώματα μέσα σε έναν Σπούτνικ χάνουν το βάρος τους). Αλλά αυτή η παραδοχή συμποσούται στη διατύπωση ότι δεν υπάρχει φυσική σχετικότητα στη γενική περίπτωση.

Για να σώσει την έννοια της «αρχής της σχετικότητας», ο Αϊνστάιν άρχισε να ερμηνεύει αυτό τον όρο όχι με φυσικό αλλά με μαθηματικό τρόπο. Πρώτα τον

ερμήνευσε (κάπως συγκεχυμένα) ως ταυτόσημη μορφή των φυσικών νόμων σε δύο συστήματα αναφοράς). Μετά αντικατέστησε τους φυσικούς νόμους με διαφορικές εξισώσεις (εξισώσεις κίνησης και πεδιακές εξισώσεις που δεν περιλαμβάνουν αρχικές και οριακές συνθήκες) και επίσης αντικατέστησε τα συστήματα αναφοράς με συστήματα συντεταγμένων. Μ' αυτή την αλλαγή στο νόημα των χρησιμοποιούμενων όρων φαινόταν να διατηρείται η ιδέα μιας «γενικής σχετικότητας». Αλλά ο τελευταίος αυτός όρος δεν σήμαινε, σε τελευταία ανάλυση, τίποτα περισσότερο από μια απλή «συμμεταβολή των διαφορικών εξισώσεων για γενικούς μετασχηματισμούς συντεταγμένων». Και η απαίτηση αυτή ισοδυναμεί με την πρόταση ότι διαφορικές εξισώσεις [που γράφονται] με διαφορετικές ανεξάρτητες μεταβλητές πρέπει να είναι μαθηματικά ισοδύναμες και όχι αντιφατικές. Η πρόταση αυτή είναι εντελώς προφανής, αλλά η φύση της είναι καθαρά λογική και δεν έχει το χαρακτήρα φυσικού νόμου (αυτό αποδείχτηκε ήδη το 1929 από τον Kretschmann).

Βλέπουμε ότι η αρχή σχετικότητας των Γαλιλαίου – Λόρεντζ, που αποτελεί συστατικό μέρος της θεωρίας του Αϊνστάιν του 1905 με τις αναρίθμητες φυσικές συνέπειές της, μετατρέπεται μ' αυτού του είδους τη «γενίκευση» σε μια καθαρά τυπική λογική απαίτηση, χωρίς άμεση σχέση με τους φυσικούς νόμους.

Θα διατυπώσουμε τα αποτελέσματά μας με μια σύντομη φράση: *Η φυσική σχετικότητα δεν μπορεί να είναι γενική και η γενική σχετικότητα δεν μπορεί να είναι φυσική.*

Είναι πραγματικά τραγικό που ο Αϊνστάιν δεν δέχτηκε αυτό το γεγονός. Αυτό σχετίζεται άμεσα με την ατυχία όλων των προσπαθειών του να οικοδομήσει μια ενιαία θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού και του βαρυτικού πεδίου. Και στις άκαρπες αυτές προσπάθειες αφιερώθηκαν περισσότερες από δύο δεκαετίες στην πολύτιμη ζωή του Αϊνστάιν! Το ίδιο γεγονός τον εμπόδισε να εκτιμήσει ορθά τις δικές του ωραίες εξισώσεις της βαρύτητας. Ο ταυστής ορμής – ενέργειας, στη δεξιά μεριά αυτών των εξισώσεων, φάνηκε στον Αϊνστάιν όχι σαν κάτι που πραγματικά ανήκει στη θεωρία του αλλά σαν ξένο. Ο Αϊνστάιν μάλιστα είπε (στις αυτοβιογραφικές σημειώσεις του) ότι δεν αμφέβαλε ούτε στιγμή πως οι εξισώσεις του με τον ταυστή ορμής – ενέργειας ήταν απλώς προσωρινές. Στις έρευνές του, που αφορούν τη συναγωγή της εξίσωσης της κίνησης από την εξίσωση της βαρύτητας, ο Αϊνστάιν προσπάθησε να μη χρησιμοποιήσει καθόλου τον ταυστή ορμής – ενέργειας. Αυτό οδήγησε σ' έναν ουσιαστικό περιορισμό των αποτελεσμάτων του. Οι εξισώσεις κίνησης που πέτυχε περιορίζονταν στην περίπτωση σημειακών μαζών. Η γενικότερη περίπτωση μαζών πεπερασμένου μεγέθους με καθορισμένη εσωτερική δομή, και όχι κατ' ανάγκην μη περιστρεφόμενων και σφαιρικών, ερευνήθηκε μόνο στις εργασίες μου και στις εργασίες των μαθητών μου.

Ο Αϊνστάιν επιχείρησε επίσης να θεωρήσει τα στοιχειώδη σωματία ως ανωμαλίες (singularities) κάποιου κλασικού πεδίου, και δεν ακολούθησε το δρόμο που άνοιξε η κβαντική μηχανική. Θα έπρεπε να σημειωθεί το παράδοξο ότι ο Αϊνστάιν, που πρώτος εισήγαγε την έννοια των φωτονίων και τις απριόρι πιθανότητες στη φυσική, δεν αποδέχτηκε ποτέ την κβαντική μηχανική*. Ο Ν. Μπορ, στις Συζητήσεις με τον Einstein, γράφοντας για το Συνέδριο του Σολβαί το 1927, κάνει τις ακόλουθες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις.

«Θυμάμαι επίσης πώς στο αποκορύφωμα της συζήτησης ο Έρενφρεστ, με τον συμπαθητικό τρόπο που είχε να πειράζει τους φίλους του, υπαινίχθηκε πειρακτικά τη φαινομενική ομοιότητα ανάμεσα στη στάση του Αϊνστάιν και στη στάση των αντιπάλων της θεωρίας της σχετικότητας».

Η αιτία της αρνητικής στάσης του Αϊνστάιν απέναντι στην κβαντική μηχανική φαίνεται να είναι η μη αποδοχή της ιδέας της «σχετικότητας ως προς τα μέσα παρατήρησης» που, ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί κοινή βάση τόσο της κβαντικής μηχανικής όσο και της θεωρίας της σχετικότητας.

Η αντιφατική στάση του Αϊνστάιν στα θεμελιακά προβλήματα της νεότερης φυσικής οδηγεί στο συμπέρασμα πώς βρισκόταν σε λανθασμένο δρόμο στις δυο ή, ακόμα, στις τρεις τελευταίες δεκαετίες της ζωής του.

Ας επιστρέψουμε τώρα στις ιδέες που φαίνονταν στον Αϊνστάιν ότι αποτελούν τα θεμέλια της θεωρίας του για τη βαρύτητα, και συγκεκριμένα στην ιδέα της γενικής συμμεταβλητότητας και στην ιδέα της κινηματικής ερμηνείας της βαρύτητας (στην «αρχή της γενικής σχετικότητας») και στην «αρχή της ισοδυναμίας»). Είναι φανερό ότι οι ιδέες αυτές τον βοήθησαν να διατυπώσει τη θεωρία του για τη βαρύτητα. Η ευρετική αξία τους είναι αναμφίβολη. Ποια είναι όμως η αληθινή θέση αυτών των ιδεών στη θεωρία της βαρύτητας;

Η απαίτηση για γενική συμμεταβλητότητα είναι ίσως μια νύξη ή μια ένδειξη τού ότι δεν είναι πάντοτε δυνατόν να θεωρούμε κάποιο καθορισμένο σύστημα συντεταγμένων (ή μια τάξη συστημάτων) σαν προνομιούχο και ότι μπορούν να εμφανιστούν περιπτώσεις (όπως στο κοσμολογικό πρόβλημα) όπου η απροσδιοριστία στο σύστημα συντεταγμένων είναι ουσιαστική. Όσο για την αρχή της ισοδυναμίας, μπορεί να περιέχει μιαν ένδειξη για την ανάγκη αναζήτησης της λύσης του προβλήματος της βαρύτητας σε χρονογεωμετρικές θεωρήσεις. Ίσως οι νύξεις αυτές να έπαιζαν κάποιο ρόλο στους συλλογισμούς που οδήγησαν τον Αϊν-

* Το σωστό είναι ότι ο Αϊνστάιν δεν δέχτηκε την ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής από τη Σχολή της Κοπεγχάγης. Δεν δέχτηκε την αντικαιποκρατική ερμηνεία και την άποψη ότι η κβαντομηχανική περιγραφή είναι μια πλήρης περιγραφή του μικρόκοσμου. Ο Αϊνστάιν υπερασπίστηκε τις τρεις βασικές αρχές: ρεαλισμός, αιτιότητα και τοπικότητα. Συνοπτικά, μια ρεαλιστική και τοπική ερμηνεία. (ΣΤΜ)

στάιν στη θεωρία το. Αλλά πιο ουσιαστική για τον Αϊνστάιν ήταν η πεποίθηση ότι, αν μια φυσική θεωρία πρόκειται να είναι αληθινή, αν εκφράζει αληθινούς νόμους της φύσης, τότε πρέπει να έχει και μαθηματική τελειότητα και κομψότητα. Η θεωρία της βαρύτητας του Αϊνστάιν ικανοποιεί την αισθητική αυτή απαίτηση με λαμπρό τρόπο και την υποστηρίζει.

Μπορούμε τώρα να εκθέσουμε σύντομα τις ιδέες και τις αρχές που πραγματικά συνιστούν το θεμέλιο της θεωρίας της βαρύτητας του Αϊνστάιν. Στην πρώτη θέση έχουμε τη χρονογεωμετρική αντίληψη, δηλαδή την ενοποίηση του χώρου και του χρόνου σε μια τετραδιάστατη πολλαπλότητα με ακαθόριστη μετρική. (Η ιδέα αυτή βρήκε επίσης την έκφρασή της στη θεωρία της σχετικότητας του 1905.) Έπειτα έχουμε την ιδέα της μεταβλητότητας της μετρικής, την απόρριψη του αξιώματος της άκαμπτης μετρικής. Μια νύξη γι' αυτό μπορεί να βρεθεί στο έργο του Ρήμαν, αλλά μόνον ο Αϊνστάιν πέτυχε μια ποσοτική διατύπωση αυτής της ιδέας.

Σύμφωνα με τη θεωρία του Αϊνστάιν, η μετρική εξαρτάται από τις φυσικές διεργασίες στο χώρο και το χρόνο, και ειδικότερα από την κατανομή και την κίνηση των μαζικών σωμάτων, τα οποία υπόκεινται στις δυνάμεις της βαρύτητας. Το λαμπρό επίτευγμα του Αϊνστάιν συνίσταται στο ότι αποκατέστησε την ενότητα της μετρικής και της βαρύτητας. Η ενότητα αυτή εκφράζεται τυπικά με το αξίωμα ότι τόσο η μετρική όσο και η βαρύτητα εκφράζονται με το ίδιο σύνολο ποσοτήτων – τον μετρικό ταυυστή. Η σύνδεση ανάμεσα στον μετρικό ταυυστή και στην κατανομή των μαζών (τον ταυυστή ορμής – ενέργειας) δίνεται από τις γνωστές εξισώσεις της βαρύτητας του Αϊνστάιν, που πρέπει να θεωρηθούν από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα της ανθρώπινης διανοίας.

Μπορούμε λοιπόν να δούμε τη θεωρία του Αϊνστάιν ως έκφραση της αρχής της ενότητας ανάμεσα στη μετρική και στη βαρύτητα. Όσο για τις αρχές της σχετικότητας και της ισοδυναμίας, είναι, το πολύ, χρήσιμες νύξεις που υποδεικνύουν πιθανούς δρόμους για τη θεωρία.

Επιστρέφουμε τώρα στο ζήτημα της φυσικής σχετικότητας. Είναι φανερό (και το εκθέσαμε προηγουμένως) ότι η φυσική σχετικότητα δεν μπορεί να είναι γενική. Αλλά ακόμα και στη θεωρία της βαρύτητας του Αϊνστάιν, η οποία λειτουργεί με μη ομοιόμορφο χωρόχρονο, η φυσική σχετικότητα, όπως εκφράζεται από τους μετασχηματισμούς του Λόρεντς, είναι ακόμα δυνατή σε μερικές περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται στην απόρριψη του αξιώματος της άκαμπτης μετρικής. Για μια άκαμπτη μετρική η φυσική σχετικότητα είναι δυνατή μόνο σε επίπεδο χώρο (ή σε χώρο με σταθερή καμπυλότητα). Στην περίπτωση μεταβλητής μετρικής η κατάσταση είναι διαφορετική. Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν μετασχηματισμοί συντεταγμένων που αντιστοιχούν στην κίνηση με βάση τη φυσική σχετικότητα, εφόσον η αλλαγή στον μετρικό ταυυστή, που προκύπτει από

τέτοιους μετασχηματισμούς, μπορεί να αντισταθμιστεί με μια προσαρμογή των φυσικών συνθηκών.

Για να πάρουμε ένα απλό παράδειγμα μιας τέτοιας προσαρμογής, ας θεωρήσουμε δύο εργαστήρια στην επιφάνεια της Γης. Εκεί ο χώρος δεν είναι ισότροπος: οφείλει κανείς να κάνει διάκριση ανάμεσα στις δύο διευθύνσεις «πάνω» και «κάτω». Έτσι, αν βάλουμε το ένα εργαστήριο στο πάτωμα προς τα πάνω, οι συνθήκες στο εσωτερικό του θα αλλάξουν ολοκληρωτικά. Αλλά αν μεταφέρουμε προσεκτικά το εργαστήριο αυτό στους αντίποδες, τότε οι φυσικές συνθήκες στο εσωτερικό του θα είναι ακριβώς οι ίδιες με εκείνες του εργαστηρίου που διατήρησε την αρχική του θέση, παρά το γεγονός ότι το δεύτερο αυτό εργαστήριο είναι τώρα αντιπαράλληλο σε σχέση με το πρώτο. Συνεπώς, η φυσική αρχή της σχετικότητας, σε σχέση με τη στροφή των αξόνων, ισχύει ακόμα.

Στην περίπτωση της κατανομής των μαζών σε νησίδες, όπως η κατανομή στο ηλιακό σύστημα, η φυσική σχετικότητα υπάρχει πάντα. Εκφράζεται απλούστερα με βάση τις αρμονικές συντεταγμένες, που μπορούν να εισαχθούν σ' αυτή την περίπτωση. Οι αρμονικές συντεταγμένες ορίζονται με τη βοήθεια της κυματικής εξίσωσης με οριακές συνθήκες στο άπειρο (ευκλείδειος χαρακτήρας του χώρου και απουσία εισερχόμενων κυμάτων). Η σύνδεση ανάμεσα σε δύο συστήματα αναφοράς, για τα οποία ισχύει η αρχή της φυσικής σχετικότητας, εκφράζεται με μια γραμμική (συγκεκριμένα, με ένα μετασχηματισμό Λόρεντς) ανάμεσα στις αρμονικές συντεταγμένες (ο μετασχηματισμός πρέπει να συνοδεύεται από μια κατάλληλη αλλαγή στην κατανομή των μαζών).

Οι αρμονικές συντεταγμένες μπορεί να θεωρηθούν προνομιακές, με την έννοια ότι είναι οι μόνες για τις οποίες η φυσική σχετικότητα εκφράζεται με γραμμικούς μετασχηματισμούς. Δεν είναι βέβαια περισσότερο (αλλά ούτε και λιγότερο) προνομιούχες από τις συντεταγμένες του Γαλιλαίου στη λεγόμενη ειδική θεωρία της σχετικότητας, των οποίων είναι το πλησιέστερο ανάλογο. Από πρακτική άποψη είναι περισσότερο βολικές, εφόσον η χρησιμοποίησή τους διευκολύνει αφάνταστα τους υπολογισμούς.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για να υπάρχουν οι αρμονικές συντεταγμένες, θα πρέπει να ισχύουν ειδικές συνθήκες όσον αφορά την κατανομή των μαζών. Είναι ωστόσο δυνατές ιδανικές περιπτώσεις (όπως η περίπτωση του χώρου του Φρήντμαν) όταν ορισμένα συστήματα συντεταγμένων διακρίνονται από άλλα χάρη στις ειδικές ιδιότητές τους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη αρμονικών συντεταγμένων είναι ένα ολοκληρωτικό (σε αντιπαράβολη με το τοπικό) χαρακτηριστικό του χωροχρόνου. Για να τις έχουμε, πρέπει να ολοκληρωθούν διαφορικές εξισώσεις με οριακές συνθήκες. Σε σχέση μ' αυτό μπορεί να γίνει μια γενική παρατήρηση, ότι δηλαδή τα ολοκληρωτικά χαρακτηριστικά δεν είναι λιγότερο σπουδαία από τα τυπικά

(δηλαδή απ' αυτά που ισχύουν σε μια απειροστή περιοχή ή που έχουν μορφή διαφορικών εξισώσεων). Ακόμη, δεν θα ήταν ορθό να δεχτούμε ότι όλοι οι φυσικοί νόμοι μπορούν να αναχθούν σε ταυστικές σχέσεις.

Συμπερασματικά, θα ήθελα να τονίσω με όλη τη δυνατή έμφαση ότι μια ελεύθερη και χωρίς προκαταλήψεις κριτική της ωραίας χρονογεωμετρικής θεωρίας της βαρύτητας που δημιουργήθηκε από τον Αϊνστάιν μπορεί να συμβάλει σε αποσαφήνιση των αρχών της και δεν εισάγει οποιαδήποτε αμφιβολία ως προς την ισχύ της. Ελπίζω λοιπόν ότι ο κριτικός χαρακτήρας του κειμένου μου δεν θα ερμηνευθεί σαν ένα είδος μη αποδοχής της θεωρίας του Αϊνστάιν ή σαν υποτίμηση των επιτευγμάτων του. Ο Αϊνστάιν είναι αναμφισβήτητα ένα από τα μεγαλύτερα επιστημονικά πνεύματα στην ιστορία της ανθρωπότητας και η θεωρία του για τη βαρύτητα είναι το μεγαλύτερο επίτευγμά του.

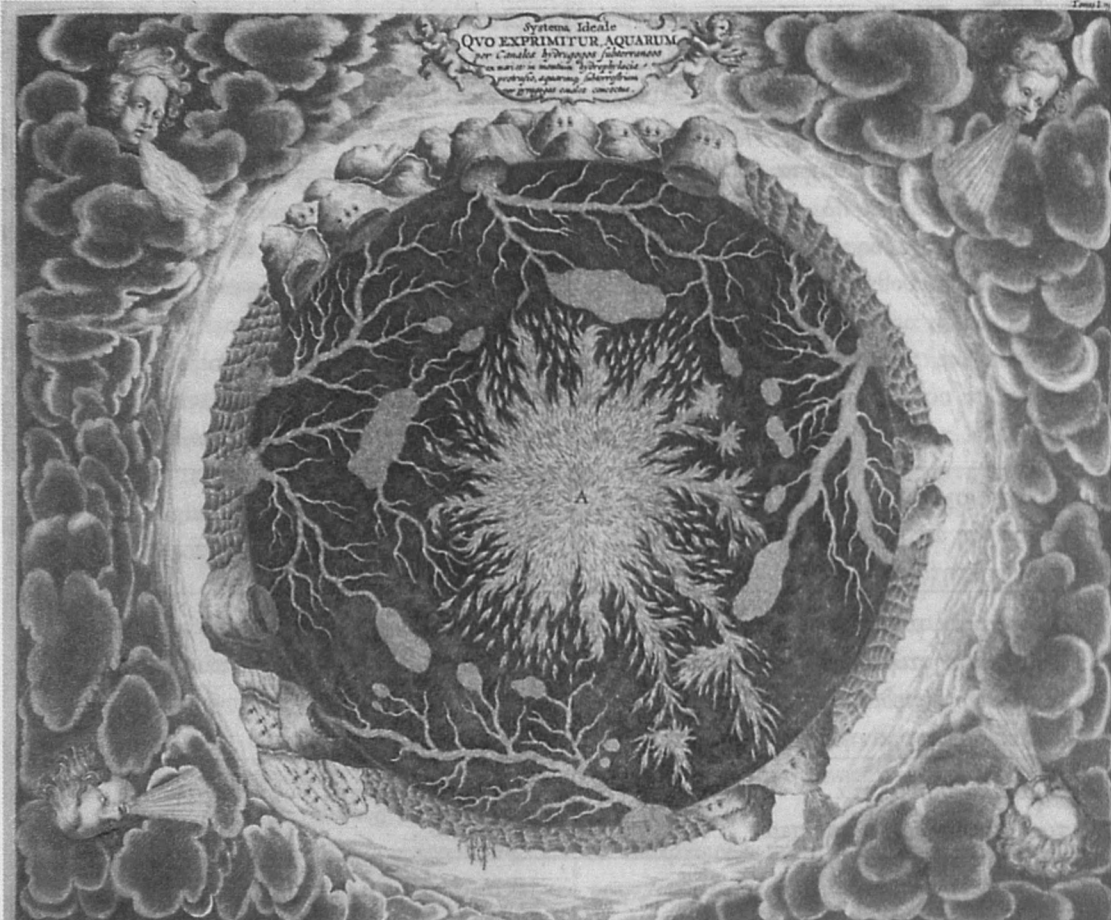
Μετάφραση: Ευτύχης Μπιτσάκης

ΠΙΝΑΚΑΣ

Διαφορετικές ερμηνείες της έννοιας της σχετικότητας

Φυσική σχετικότητα = = ύπαρξη αντίστοιχων φαινομένων = ταυτότητα φυσικών συνθηκών	Σε δύο εργαστήρια
Ταυτόσημη μορφή των φυσικών νόμων Ταυτόσημη μορφή των διαφορικών εξισώσεων (πεδιακές εξισώσεις και εξισώσεις κίνησης)	Σε δύο συστήματα αναφοράς
Συμμεταβλητότητα των διαφορικών εξισώσεων	Σε δύο συστήματα συντεταγμένων

Εἰς τὴν ἀρχὴν τοῦ κόσμου ἦν τὸ πνεῦμα καὶ ἡ ζωὴ καὶ ἡ ἀγάπη τοῦ Θεοῦ, καὶ τὰ τρία ἕνα ἦσαν. Καὶ ἐγένετο ἡ ἀνάστασις τοῦ Χριστοῦ ἐκ τῶν νεκρῶν καὶ ἡ ἀνάστασις τῶν νεκρῶν ἐκ τῆς ἀνάστασις τοῦ Χριστοῦ.



Ignis centralis A. undiq; et undiq; per poropori canales exhalationes spiritus ignis diffundit; his hydrophylaciis impactis, partim in thermas disponit partim in vapores attenuat qui concorporum aëtorum fornicibus illis, frigore loci condensati in aquas densas resoluunt foete rivosq; generant: partim in altu divocorum mineralium succis factis matricis deripati in metallicas corpora coalescunt; aut in novam combustibilis materiam factam ad ignis nutrimentum defluunt. Mox hic quop quemodo flare vitæ itaere pro vel submotus, aquas per subterraneas cuniculas in altissima montium hydrophylacia quæletur. Ad Figura te velis docebit omnia, quam ego fissuris poris non expulsi Vidi quop Subterranean Orbem, in extrema superficie terre mare camparq; subterq; et hoc aëre, ut schema docet: Reliqua exactius ac ipsa operu dæcylone et ratiocinio patebunt.

Athanasie Kircher, *Mundus supterraneus in XII eibros digestus*, 1665.