Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ & ΓΕΝΙΚΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

ΑΛΒΕΡΤΟΣ ΑΪΝΣΤΑΪΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΕΡΕΥΝΩΝ
1958

ΑΘΗΝΑ 2006

ΑΛΒΕΡΤΟΣ ΑΪΝΣΤΑΪΝ (1879-1955)

Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (1916)

Μετάφραση: Ευγενία Γραμματικοπούλου

ΑΘΗΝΑ 2006

ISBN: 960-7998-34-0

© Copyright 2006

Επιμέλεια Έκδοσης: Ελένη Γραμματικοπούλου - Υπεύθυνη Μορφωτικών Εκδηλώσεων του ΕΙΕ
Συντονίστρια του Προγράμματος ΕΡΜΗΣ-ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΘΥΡΕΣ 2ος κύκλος 2005

Σχεδίαση, Παραγωγή: S&P ADVERTISING
Ασκληπιού 154, 114 71 Αθήνα
Τηλ.: 210 64 62 716, Fax: 210 64 52 570
e-mail: central@spad.gr, www.spad.gr

Φωτογραφία εξωφύλλου: Ο Άγγλος ηθοποιός Garry Barber υποδύεται τον Albert Einstein.
Ομάδα graffitti ΛΕΚΙ.
Από τα γυρίσματα του ντοκιμαντέρ «Φυσικής Περίπλους»,
παραγωγής ΕΙΕ, στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Προγράμματος
ΕΡΜΗΣ-ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΘΥΡΕΣ 2ος κύκλος 2005

Το Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, στο πλαίσιο του Γ΄ ΚΠΣ, ΑΞΟΝΑΣ 4, ΜΕΤΡΟ 4.4., ΔΡΑΣΗ 4.4.5: ΕΡΜΗΣ-ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΘΥΡΕΣ 2ος ΚΥΚΛΟΣ 2005, ανέλαβε μια σειρά δραστηριοτήτων για την προβολή του ερευνητικού του έργου στο ευρύτερο κοινό.

Μία από αυτές είναι η παραγωγή του επιστημονικού ντοκιμαντέρ εκλαϊκευτικού χαρακτήρα σε DVD «Φυσικής Περίπλους – Η Γένεση της σύγχρονης Φυσικής» το οποίο θα διανεμηθεί τόσο σε μαθητές Λυκείου όσο και σε φοιτητές και το οποίο ενσωματώνεται στην παρούσα έκδοση «Η θεωρία της ειδικής και γενικής σχετικότητας» μια απλουστευτική συνοπτική εισαγωγή που έγραψε ο ίδιος ο Αϊνστάιν.

Η παραγωγή αυτή έγινε με αφορμή το «Διεθνές έτος Φυσικής» με στόχο να μεταφέρει στον απλό πολίτη τον ενθουσιασμό και την ομορφιά της φυσικής επιστημονικής σκέψης που παράγεται σήμερα μέσα από τη Φυσική, (πεδίο έρευνας που κατ' εξοχήν καλλιεργεί τη φαντασία), να τον εξοικειώσει με τα σύγχρονα επιτεύγματα και να επιτρέψει στον ανθρώπινο νου να συλλάβει το σύμπαν στην ολότητά του.

Την επιστημονική επιμέλεια του ντοκιμαντέρ ανέλαβαν οι ερευνητές του ΕΙΕ Θύμιος Νικολαΐδης, Διευθυντής Ερευνών στο Ινστιτούτο Νεοελληνικών Ερευνών και Γιάννης Πετσαλάκης, Διευθυντής Ερευνών στο Ινστιτούτο Θεωρητικής και Φυσικής Χημείας, σε συνεργασία με ομάδα επιστημόνων του Παιδαγωγικού Τμήματος Δημοτικής Εκπαίδευσης του Τομέα Φυσικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Προς όλους οφείλουμε να απευθύνουμε τις θερμές μας ευχαριστίες.

Ελένη Γραμματικοπούλου
Υπεύθυνη Μορφωτικών Εκδηλώσεων ΕΙΕ
Συντονίστρια του Προγράμματος ΕΡΜΗΣ-ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΘΥΡΕΣ 2ος ΚΥΚΛΟΣ 2005

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ – Η ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Εκτός από κορυφαίος φυσικός, ο Αϊνστάιν υπήρξε και σπουδαίος εκλαϊκευτής της φυσικής, κυρίως βεβαίως των δικών του θεωριών, της ειδικής και γενικής θεωρίας της σχετικότητας. Έγραψε διάφορα κείμενα τα οποία παρουσιάζουν αυτές τις θεωρίες στο ευρύ κοινό. Η μπροσούρα που εκδίδουμε είναι το πλέον διαδεδομένο του κείμενο πάνω στο εν λόγω θέμα. Τα τελευταία χρόνια έχουν γραφτεί πολλά –και καλά– κείμενα που απλοποιούν την ειδική και την γενική θεωρία της σχετικότητας. Θεωρήσαμε όμως ότι θα είναι πολύ χρήσιμο να ξαναπαρουσιάσουμε στο ελληνικό κοινό το ιστορικό αυτό κείμενο, με την ευκαιρία της συμπλήρωσης 100 χρόνων από τη γέννηση της ειδικής θεωρίας.

Η μπροσούρα αυτή έχει ήδη εκδοθεί στα ελληνικά το 1926 από τον εκδοτικό οίκο «Παρασκήνια» με τον τίτλο «ΑΛΒΕΡΤΟΣ ΑΪΝΣΤΑΪΝ. Η θεωρία της ειδικής και γενικής σχετικότητος». Δυστυχώς η μετάφραση αυτή τόσο λόγω γλώσσας (καθαρεύουσα) όσο και μεταφραστικής τεχνικής είναι πλέον ξεπερασμένη. Έτσι προχωρήσαμε σε μια νέα μετάφραση, στην οποία παραθέτουμε ένα σύντομο εισαγωγικό με πληροφορίες για τη ζωή και το έργο του Αϊνστάιν.

Ευθύμιος Νικολαΐδης
Διευθυντής Ερευνών
Ινστιτούτο Νεοελληνικών Ερευνών
Επιστημονικός Υπεύθυνος του Προγράμματος ΕΡΜΗΣ-ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΘΥΡΕΣ

Η θεωρία της σχετικότητας είναι ένα προϊόν εξέλιξης των εννοιών της φυσικής αλλά και της ανυπέρβλητης ιδιοφυίας του Αϊνστάιν, ο οποίος τόλμησε να αμφισβητήσει την καθημερινή πραγματικότητα. Είναι μία εντελώς ριζοσπαστική άποψη για το τι είναι πραγματικά ο χώρος που μας περιβάλλει καθώς επίσης και ο χρόνος στον οποίο εξελίσσονται τα πάντα γύρω μας.

Ο Αϊνστάιν ίσως μπορεί να παραλληλισθεί με τον Θαλή που τόλμησε πρώτος να σκεφθεί ότι μπορούμε να ερμηνεύσουμε τον κόσμο μας με τη λογική ή τους Κέπλερ και Γαλιλαίο οι οποίοι πίστεψαν στο πείραμα και το κατέστησαν μέσο εξέλιξης των ιδεών τους. Ξεκινώντας από το πειραματικό δεδομένο της πεπερασμένης σταθερής ταχύτητας του φωτός για τον καθένα μας και παρακινούμενος από την αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου θεώρησε πως όλοι οι νόμοι της φυσικής παραμένουν οι ίδιοι για όλους μας, ανεξάρτητα από την κίνησή μας.

Οι συνέπειες στάθηκαν ακατανόητες, καθότι αντίθετες προς τις καθημερινές εμπειρίες μας. Κάθε τι έξω από εμάς που κινείται συστέλλεται. Ο χρόνος του κυλάει πιο αργά. Ταυτόχρονα γεγονότα δεν υπάρχουν για δύο άτομα που κινούνται το ένα ως προς το άλλο. Το μόνο που μας σώζει από την παράνοια είναι ότι η ταχύτητα του φωτός είναι εξαιρετικά μεγάλη, κατά πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από οποιαδήποτε ταχύτητα με την οποία μπορεί σήμερα να ταξιδέψει ο άνθρωπος. Έτσι, η τομή που επέφερε στη σκέψη ο Αϊνστάιν ξεπερνά την καθημερινότητα.

Ο Αϊνστάιν όμως δεν σταμάτησε εδώ. Με τη γενική θεωρία της σχετικότητας εξηγεί πως αν ανέβουμε σε ένα κλειστό σύστημα που επιταχύνεται σταθερά ποτέ δεν θα μπορέσουμε να ξεχωρίσουμε αν κινούμαστε ή αν βρισκόμαστε πάνω σε έναν πλανήτη που προκαλεί την ίδια επιτάχυνση της βαρύτητας. Και πώς τα εξηγεί όλα αυτά; Αλλάζοντας την έννοια του χώρου. Ο χώρος που μας περιβάλλει δεν είναι ο ίδιος παντού: καμπυλώνεται εκεί όπου υπάρχει μάζα. Έτσι δημιουργεί μονοπάτια που οδηγούν τη μία μάζα πάνω στην άλλη. Δεν χρειάζεται δηλαδή καν η έννοια των ελκτικών δυνάμεων, ο νόμος της παγκόσμιας έλξης για να κινηθεί μία μάζα από μία άλλη. Απλά ακολουθούν τον συντομότερο δρόμο στον καμπυλωμένο χώρο του Αϊνστάιν. Και το κυριότερο: όλα αυτά δεν είναι εικασίες, αληθεύουν καθώς υπάρχουν μετρήσεις και πειράματα που τα αποδεικνύουν.

Για όλα αυτά όμως ας ανατρέξουμε στο κείμενο που ακολουθεί, ένα εκλαϊκευτικό κείμενο πάνω στη θεωρία της σχετικότητας, δίνοντας τον λόγο στον ίδιο τον Αϊνστάιν που υπήρξε όχι μόνο ο καταλληλότερος αλλά και ο καλύτερος εκλαϊκευτής της σύνθετης σκέψης του.

Ιωάννης Πετσαλάκης

Φυσικός

Διευθυντής Ερευνών

Ινστιτούτο Θεωρητικής & Φυσικής Χημείας/ΕΙΕ

ΑΛΒΕΡΤΟΣ ΑΪΝΣΤΑΪΝ (1879-1955)

Ίσως να πρόκειται για μία από τις πλέον εμβληματικές φυσιογνωμίες στον κόσμο. Ελάχιστοι δεν θα αναγνώριζαν το πρόσωπο με τα μακριά γκρίζα μαλλιά, το χαρακτηριστικό μουστάκι και το σπινθηροβόλο βλέμμα, πόσο μάλλον απαθανατισμένο τη στιγμή που μοιάζει να κοροϊδεύει –έχοντας πρώτα βάλει τα γυαλιά– στη γηραιά κατεστημένη επιστημονική γνώση.

Ο Albert Einstein είναι από τους ανθρώπους εκείνους που τη στιγμή που έβλεπε το φως αυτού του κόσμου, στις 14 Μαρτίου 1879 στην πόλη Ulm της Γερμανίας, του χαμογέλασε η Μοίρα. Όπως όμως συχνά συμβαίνει και στα παραμύθια, την ώρα που οι Μοίρες του έπλεκαν ένα λαμπρό μέλλον, μια κακιά μάγισσα ξεγλίστρησε κι έσπειρε κατάρες που δυσκόλεψαν το μονοπάτι της ζωής του.

Ένα χρόνο αργότερα, μωρό στην αγκαλιά της μητέρας του Paulina, ταξιδεύει στο Μόναχο όπου μετακομίζει η οικογένεια, καθώς ο θείος και πατέρας του Herman ιδρύουν ένα μικρό ηλεκτρολογικό εργοστάσιο. (Οι γονείς του ανήκαν στην εβραϊκή αστική τάξη εμπόρων που είχε από χρόνια εγκατασταθεί στη νότια Γερμανία, στην περιοχή της Σουηβίας). Την επόμενη χρονιά γεννιέται κι η αδελφή του Maya με την οποία θα βαδίσουν πλάι-πλάι στις δύσκολες αλλά και τις χαρούμενες στιγμές. Οι γονείς του αρχικά ανησυχούσαν με τον μικρό Albert που σπάνια μιλούσε μέχρι την ηλικία των τριών ετών, αδυνατώντας φυσικά να μαντέψουν ότι στο μέλλον ο λαλίστατος επιστήμονας θα μιλούσε άφοβα για σημαντικά πράγματα, εκεί που άλλοι, δήθεν σημαντικοί, θα δίσταζαν ή θα σιωπούσαν...

Το ενδιαφέρον του Einstein για τις επιστήμες εκδηλώθηκε ήδη από τη νηπιακή του ηλικία. Τα μάτια του έλαμψαν όταν ο πατέρας του τού έδειξε μια πυξίδα, ενώ λίγο αργότερα, το 1891 και σε ηλικία έντεκα μόλις ετών, αρχίζει το γοητευτικό του ταξίδι στον κόσμο των μαθηματικών ξεφυλλίζοντας ένα βιβλίο γεωμετρίας. Παρ' όλα αυτά, αρνείται επίμονα να προσαρμοστεί στην πειθαρχία και την παραδοσιακή διδασκαλία ενός τυπικού πρωσικού σχολείου, ώσπου το 1895 διακόπτει τις σπουδές του και –χωρίς να γνωρίζει λέξη ιταλικά– ακολουθεί την οικογένειά του στο Μιλάνο, όπου αυτή είχε εγκατασταθεί μετά την αποτυχία της επιχειρηματικής προσπάθειας του πατέρα του στη Γερμανία το 1894. Τον επόμενο χρόνο αρχίζει έναν νέο κύκλο σπουδών στο Τεχνικό Σχολείο του Aarau[1] απ' όπου αποφοιτά με εξαιρετικούς βαθμούς.

Αργότερα θα ανακαλεί πρόθυμα στη μνήμη του τα χρόνια αυτά, αφού μονάχα ευχάριστες αναμνήσεις έρχονται στο νου του από την εκεί παραμονή του. Η αποστροφή του για την τυποποιημένη γνώση και η έλξη του για τη δημιουργική διαδικασία της επιστημονικής έρευνας καθρεφτίζεται στο γεγονός ότι ήδη εκείνη την πρώιμη περίοδο συνθέτει ένα σύντομο άρθρο επιχειρώντας να μελετήσει τη μονιμότητα του μαγνητικού πεδίου που βρίσκεται κοντά σε ηλεκτρικό ρεύμα.[2]

Τον Οκτώβριο του 1896 ξεκινά ανώτερες σπουδές στο υψηλού κύρους Πολυτεχνείο της Ζυρίχης, όπου συναντά και τη μέλλουσα σύζυγό του Mileva Maric. Αποφοιτά το 1900 έχοντας ήδη δημιουργήσει λόγω του ιδιόρρυθμου χαρακτήρα του αρκετές αντιπάθειες μεταξύ των καθηγητών του, που σίγουρα επέδρασαν αρνητικά στις πρώτες προσπάθειες επαγγελματικής του αποκατάστασης. Από τους τέσσερις αποφοίτους του τμήματος είναι ο μόνος που δεν προσλαμβάνεται στο εν λόγω Πολυτεχνείο. Η αντιπάθεια προς το πρόσωπό του εκφράζεται ανοικτά από τον χαρακτηρισμό του διάσημου μαθηματικού Herman Minkowski: «Τεμπελόσκυλο!».

Αν και η ιδιοσυγκρασία του δεν μπαίνει εύκολα σε καλούπια (κλασικός τύπος αντικομφορμιστή), ωστόσο βγαίνει στην αγορά εργασίας: μάταιος κόπος, καθώς βρίσκει κλειστές όλες τις πόρτες στη Γερμανία, την Ολλανδία και την Ιταλία. Παρά τις ζοφερές προοπτικές, ο Einstein δεν χάνει το κουράγιο του και διδάσκει σε διάφορα σχολεία της περιοχής, όπως στην τεχνική σχολή του Vintertour στην Ελβετία, ή παραδίδει ιδιαίτερα μαθήματα για να εξασφαλίσει ένα αξιοπρεπές εισόδημα. Τα πράγματα γίνονται δυσκολότερα καθώς η Mileva, με την οποία παντρεύεται τον Ιανουάριο του 1903 στη Βέρνη, φέρνει στον κόσμο την κόρη τους Liesel, η οποία εξαιτίας των οικονομικών δυσχερειών της οικογένειας δίνεται για υιοθεσία στη Βουδαπέστη και τα ίχνη της χάνονται για πάντα.

Όμως ο Einstein βρίσκεται σε μια περίοδο επιστημονικής δημιουργίας και τα πρώτα άρθρα του δημοσιεύονται στο έγκυρο περιοδικό *Annalen der Physik*. Στη Βέρνη, όπου έχει ήδη βρει δουλειά ως ειδικός τρίτης τάξεως στο γραφείο ευρεσιτεχνιών, δημιουργεί με τους φίλους του Maurice Solovine και Conrad Habicht την Ολύμπια Ακαδημία, έναν άτυπο κύκλο φιλοσοφικών αναζητήσεων. Αν και οι δρόμοι τους μοιραία κάποτε χωρίζουν, οι σχέσεις τους παραμένουν πάντοτε στενές, όπως αποδεικνύεται και από τη σχετική αλληλογραφία. Στις 14 Μαΐου 1904 γεννιέται ο πρώτος του γιος, ο μικρός Hans Albert.

---

1. Το Aarau είναι η πρωτεύουσα του καντονίου της Αργοβίας, στα βόρεια της Ελβετίας. Το καντόνιο αυτό έχει ως φυσικό του όριο στα βόρεια τον Ρήνο, που το χωρίζει από τη Γερμανία.
2. *Περί των μελετών σχετικά με την κατάσταση του αιθέρα σε ένα μαγνητικό πεδίο, βλ. The collected Papers of Albert Einstein,* 1.6.

Ο επόμενος χρόνος είναι για τον Einstein η κορυφαία στιγμή της σταδιοδρομίας του καθώς δημοσιεύονται στο *Annalen der Physick* τρεις εργασίες του οι οποίες άλλαξαν εντελώς την εικόνα μας για τον κόσμο. Η σημασία των εργασιών αυτών για την εξέλιξη της φυσικής είναι τόσο μεγάλη ώστε η χρονιά αυτή χαρακτηρίζεται πλέον για τον Einstein και τη φυσική ως annus mirabilis. Πρόκειται για τρεις εργασίες που αφορούν την κίνηση Brown, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και την ειδική σχετικότητα. Παρά την επιστημονική επιτυχία, ο Einstein εξακολουθεί να εργάζεται με ζήλο και συνέπεια στο γραφείο ευρεσιτεχνιών, καταφέρνοντας τον επόμενο χρόνο, στα είκοσι επτά του χρόνια, να πάρει προαγωγή και να χριστεί ειδικός δεύτερης τάξης. Το 1907, προβληματισμένος από το γεγονός ότι εάν ένας άνθρωπος εκτελέσει ελεύθερη πτώση δεν θα αισθάνεται το βάρος του, αρχίζει να σχηματίζει τις πρώτες ιδέες για μια θεωρία σχετικά με τη βαρύτητα.[3]

Παρά τη διεθνή αναγνώριση, την ίδια χρονιά το Πανεπιστήμιο της Βέρνης αρνείται μια θέση στον Einstein ενώ την επόμενη χρονιά τον προσλαμβάνει ως privatdozent, ένα είδος άμισθου συνεργάτη που παραδίδει ιδιαίτερα μαθήματα σε φοιτητές. Τελικά το 1909 καταφέρνει επιτέλους να κερδίσει μια θέση έκτακτου καθηγητή στο Πανεπιστήμιο της Ζυρίχης[4] και τον Ιούλιο του ίδιου χρόνου παραιτείται από το γραφείο ευρεσιτεχνιών. Φαίνεται ότι οι δύσκολες μέρες ανήκουν στο παρελθόν και οι διεθνείς ορίζοντες αρχίζουν να ανοίγονται μπροστά του. Έτσι, στις 21 Σεπτεμβρίου συμμετέχει για πρώτη φορά σε ένα διεθνές συνέδριο φυσικής στη Γερμανία κερδίζοντας τις εντυπώσεις με μια ανακοίνωση σχετικά με τη δυνατότητα μια οντότητα άλλοτε να θεωρείται σωματίδιο και άλλοτε κύμα.

Τότε όμως εμφανίζονται τα πρώτα σύννεφα στη σχέση του με τη Mileva παρόλο που στις 2 Ιουλίου του 1910 γεννιέται ο δεύτερος γιος τους Eduard, ενώ το 1911 μετακομίζουν στην Πράγα, όπου κατέχει πλέον μια νέα θέση στο Πανεπιστήμιο, στην έδρα θεωρητικής φυσικής. Η καθιέρωση του Einstein στην επιστημονική αφρόκρεμα της εποχής σηματοδοτείται από τη συμμετοχή του το 1911 στο κορυφαίο συνέδριο του Solvay.[5] Το 1912 επιστρέφει στη Ζυρίχη ως τακτικός καθηγητής στο Πολυτεχνείο ενώ παράλληλα αρχίζει η σχέση του με την Elsa. Το 1913, ο Planck και ο Nernst τον επισκέπτονται και του προσφέρουν μια θέση χωρίς διδακτικά καθήκοντα στο Βερολίνο, παρέχοντάς του με τον τρόπο αυτόν τη δυνατότητα να επικεντρωθεί απερίσπαστος στην έρευνα που τόσο τον γοήτευε και τόσο γόνιμα κατόρθωνε να της αφιερώνεται.

---

3. Πρόκειται για τον όρο που επέλεξε ο ίδιος ο Einstein, αν και πλέον χρησιμοποιείται περισσότερο ο όρος *σχετική θεωρία της έλξεως*.
4. Η θέση αυτή είχε δημιουργηθεί κατόπιν αίτησης του καθηγητή Alfred Kleiner για τον βοηθό του Friedrich Adler, που παραιτήθηκε αυτοβούλως υπέρ του Einstein.
5. Ο Βέλγος μηχανικός Ernest Solvay (1838-1922), αφότου πλούτισε χάρη στη δική του διαδικασία παρασκευής σόδας, έθεσε την περιουσία του στην υπηρεσία της φυσικής. Οργάνωσε, μεταξύ άλλων, μια σειρά συνεδρίων όπου συγκέντρωνε τους μεγαλύτερους φυσικούς της εποχής του.

Το 1914 χωρίζει τελικά από τη Mileva, αλλά το διαζύγιο τυπικά θα εκδοθεί το 1919. Μεταβαίνει στο Βερολίνο αποδεχόμενος την πρόταση του Planck[6] και εργάζεται εκεί μέχρι το 1933. Την ίδια χρονιά αρχίζει να ενδιαφέρεται για τα κοινά υπογράφοντας ένα αντιπολεμικό μανιφέστο στη διάρκεια του πρώτου παγκοσμίου πολέμου. Το 1915 συνεχίζει να εργάζεται πάνω στη γενική θεωρία της σχετικότητας κερδίζοντας και πάλι την καθολική εκτίμηση, ιδιαίτερα όταν αυτή επαληθεύεται το 1918 από τον Eddigton[7] ο οποίος διαπίστωσε πειραματικά ότι το φως κάμπτεται εξαιτίας της βαρύτητας κατά τη διάρκεια μιας έκλειψης ηλίου.

Το 1919, με την επισημοποίηση του διαζυγίου του από τη Mileva, έχει πλέον τη δυνατότητα να παντρευτεί την αγαπημένη του Elsa. Το 1920 ξεσπά μια διαμάχη με τον επίσης σημαντικό Γερμανό φυσικό Lenard ο οποίος για πολιτικούς λόγους απορρίπτει τη θεωρία της σχετικότητας, καθώς εκφράζει τους εθνικιστικούς κύκλους με τους οποίους έρχεται σε αντιπαράθεση ο Einstein, εξαιτίας των ιδεών του σχετικά με την ειρήνη και την υποστήριξη της δημιουργίας ενός ισραηλιτικού κράτους.

Το 1921 επισκέπτεται για πρώτη φορά την Αμερική προκειμένου να εξασφαλίσει χρήματα για την υποστήριξη του σιωνιστικού κινήματος. Στην ερώτηση αν πιστεύει στον Θεό απαντά πως πιστεύει σε έναν Θεό ο οποίος φανερώνεται μέσα από την αρμονία του κόσμου κι όχι μέσα από την ενασχόλησή του με τα εγκόσμια. Την επόμενη χρονιά κερδίζει το βραβείο Nobel,[8] γεγονός που πληροφορείται ταξιδεύοντας προς την Ιαπωνία. Τον Φεβρουάριο του 1923 επισκέπτεται την Παλαιστίνη και εγκαινιάζει το Εβραϊκό πανεπιστήμιο ενώ την επόμενη χρονιά εγκαινιάζεται ο Einstein Tower στο Potsdam. Το 1925 συνεργάζεται με τον Bose και διατυπώνουν το περίφημο θεώρημα Bose-Einstein, την τελευταία σημαντική συμβολή του μεγάλου φυσικού.

Το 1926 εκφράζει ανοιχτά τη διαφωνία του προς την κβαντική φυσική όπως αυτή θεμελιώνεται από τους Heisenberg, Schroendinger, Born κ.ά., θεωρώντας ότι έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τη –θεμελιώδη κατά την

---

6. Max Planck (1858-1947), κορυφαίος Γερμανός φυσικός, συγγραφέας έργων σχετικών με το μαύρο σώμα. Γύρω στα 1900, η μελέτη της ακτινοβολίας του μαύρου σώματος τον οδήγησε στο αξίωμα ότι τα ηλεκτρόνια δεν μπορούσαν να κινητοποιηθούν από οποιεσδήποτε κινήσεις, αλλά μονάχα από ορισμένες προνομιακές κινήσεις, τις κβαντοποιημένες κινήσεις. Χρειάστηκε συνεπώς να παραδεχτεί ότι η ενέργεια ούτε εκπεμπόταν ούτε απορροφούνταν αδιαλείπτως αλλά κατά μικρές ποσότητες. Ο Planck δίσταζε να παραδεχτεί τις έσχατες συνέπειες της θεωρίας του περί κβάντα. Ο Einstein, με τις εργασίες του το 1905, επιβεβαίωσε περίτρανα τις ιδέες του Planck.

7 Arthur Eddigton (1882-1944), Άγγλος αστρονόμος. Υπήρξε ένας από τους πρώτους και πλέον ένθερμους υποστηρικτές της σχετικότητας. Ο Einstein θεωρούσε ότι το βιβλίο του *Mathematical Theory of Relativity (Μαθηματική Θεωρία της Σχετικότητας)*, που κυκλοφόρησε το 1923, ήταν η καλύτερη παρουσίαση της σχετικότητας.

8 Ο Σουηδός χημικός Alfred Nobel (1833-1896), εφευρέτης της δυναμίτιδας, ίδρυσε μέσω διαθήκης βραβεία που σκοπό τους είχαν την επιβράβευση των ευεργετών της ανθρωπότητας στους ακόλουθους πέντε τομείς: φυσική, χημεία, φυσιολογία-ιατρική, λογοτεχνία, αδελφότητα των λαών (το τελευταίο αυτό βραβείο, το λεγόμενο Nobel Ειρήνης, απονέμεται από τη Νορβηγία, ενώ τα υπόλοιπα από τη Σουηδία). Τα βραβεία Nobel απονεμήθηκαν για πρώτη φορά το 1901.

άποψή του για τη φυσική– αρχή της αιτιότητας. Εφεξής, επικεντρώνει τις προσπάθειές του στη διατύπωση μιας ενοποιημένης ή ενιαίας θεωρίας πεδίων, δηλαδή επιδιώκει να περιγράψει όλες τις δυνάμεις που υπάρχουν στη φύση με μία και μόνο εξίσωση. Τον Οκτώβριο του 1927, και πάλι στην περίφημη σύνοδο Solvay, η επίθεση του στην κβαντική θεωρία συνοψίζεται στο περίφημο: «Ο Θεός δεν παίζει ζάρια».

Ξεπερνώντας μια περιπέτεια με την υγεία του που κράτησε περίπου ένα χρόνο, το 1929 του απονέμεται το βραβείο Max Planck. Η αγάπη του όμως για τη φυσική δεν τον αποσπά τελείως και από την ενασχόλησή του με τη μουσική. Έτσι ξεκλέβει λίγες στιγμές από τη μελέτη του για να παίξει κάποια κομμάτια κλασικής μουσικής στο αγαπημένο του βιολί. Ίσως εκεί βρίσκει μια διέξοδο από τα προβλήματα της καθημερινότητας, καθώς ο γιος του Eduard παρουσιάζει σημάδια σχιζοφρένειας και η Mileva αφιερώνει όλη τη ζωή της στο διαταραγμένο ψυχικά παιδί. Το 1930 η άνοδος του ναζισμού στη Γερμανία προκαλεί νέα προβλήματα στον Einstein που φεύγει για την Αμερική με ενδιάμεσο σταθμό τη Tagore. Εκεί εργάζεται κυρίως στα Πανεπιστήμια του Caltech και του Princeton.

Το 1933 επιστρέφει στην Ευρώπη όπου και επισκέπτεται για τελευταία φορά τον γιο του. Υψώνει τη φωνή του εναντίον του φασισμού. Επανέρχεται στην Αμερική τον Οκτώβριο του 1933 και το 1935 αιτείται τη λήψη της αμερικανικής υπηκοότητας, την οποία τελικά θα λάβει ύστερα από πέντε χρόνια αναμονής το 1940. Το 1936 η Elsa πεθαίνει σε ηλικία 60 χρονών αφήνοντας σίγουρα ένα δυσαναπλήρωτο συναισθηματικό κενό στον Einstein. Στο Princeton βρίσκει ένα γόνιμο περιβάλλον που του επιτρέπει να συνεχίσει το ερευνητικό του έργο και να συνεργαστεί με τους Podolsky, Rosen, Hoffman, κ.ά. για τη σύνθεση ενδιαφερόντων επιστημονικών άρθρων. Το 1939 ο Einstein συνυπογράφει με τον Leo Slizard το περίφημο γράμμα στον Roosevelt ενώ λίγο αργότερα κηρύσσεται ο δεύτερος παγκόσμιος πόλεμος.

Από το 1940 και έως το τέλος της ζωής του παρακολουθείται από το FBI ως ύποπτος για υποστήριξη των κομουνιστών, ενώ αργότερα ο περίφημος γερουσιαστής McCarthy θα τον κατηγορήσει ως εχθρό της Αμερικής. Για τον λόγο αυτό τελικά δεν θα συμπεριληφθεί στους επιστήμονες (όπως οι Bohr, Oppenheimer, Feynman, Fermi) που ασχολούνταν με το περίφημο Manhattan Project για την κατασκευή της ατομικής βόμβας που ξεκινά το 1941. Το 1945 το πρόγραμμα ολοκληρώνεται με επιτυχία. Το αμέσως επόμενο έτος ο Einstein αρνείται την προεδρία του Ισραήλ που του προσφέρεται. Η τελευταία πινελιά στον καμβά της πολυτάραχης ζωής του μπαίνει στις 11 Απριλίου 1955 όταν δέχεται να υπογράψει το μανιφέστο για τη διακοπή των πυρηνικών εξοπλισμών που είχε προτείνει ο Bertrand Russel.[9]

---

9. Bertrand Russel (1872-1970), Άγγλος μαθηματικός, λόγιος και φιλόσοφος. Συμμεριζόταν τα αντιμιλιταριστικά και φιλειρηνικά συναισθήματα του Einstein. Το 1961, θέσπισε το Δικαστήριο Russel για την εκδίκαση της στρατιωτικής δραστηριότητας των Ηνωμένων Πολιτειών στο Βιετνάμ.

Το τέλος είναι όμως κοντά. Μια εβδομάδα μετά, στις 18 Απριλίου του 1955, ο Albert Einstein, περνά στην αθανασία. Είναι όμως βέβαιο πως είτε γράφοντας στον πίνακα είτε κάνοντας ακόμα βόλτες με το ποδήλατό του από το μακρινό αστέρι όπου βρίσκεται, θα κλείνει το μάτι στους φίλους του που ποτέ δεν ξέχασε και θα βγάζει τη γλώσσα του στους εχθρούς του που ποτέ δεν συγχώρεσε.

Γιώργος Ν. Βλαχάκης
Φυσικός
Συνεργαζόμενος Ερευνητής
στο Πρόγραμμα Ιστορίας Επιστημών
Ινστιτούτο Νεοελληνικών Ερευνών/ΕΙΕ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΤΟΥ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Σκοπός αυτού του μικρού βιβλίου είναι οι ενδιαφερόμενοι για τη θεωρία της σχετικότητας να αποκτήσουν στο μέτρο του δυνατού, από επιστημονική και φιλοσοφική άποψη, την πλέον ακριβή έννοια ιδίως όταν κατέχουν το μαθηματικό όργανο της θεωρητικής φυσικής. Η ανάγνωσή του απαιτεί πλήρη ωριμότητα πνεύματος και μολονότι συνοπτικό αξιώνει εκ μέρους του αναγνώστη ένταση υπομονής και θέλησης. Φρόντισα ιδιαιτέρως να διατυπώσω τις θεμελιώδεις ιδέες με την πλέον δυνατή διαύγεια και απλότητα και με τη σειρά που αυτές γεννήθηκαν. Για να πετύχω τη σαφήνεια αυτών που εκθέτω, έκρινα αναγκαίο πολλές φορές να μην αποφύγω τις επαναλήψεις χωρίς να ανησυχώ καθόλου για το ύψος του κειμένου· στην πρακτική αυτή ακολούθησα με ευλάβεια τη συμβουλή του μεγαλοφυούς θεωρητικού L. Boltzmann που αναφέρει «αφήστε στους ράπτες και υποδηματοποιούς τη φροντίδα της κομψότητας». Πιστεύω ότι δεν απέκρυψα από τον αναγνώστη τις δυσκολίες του θέματος. Παρέλειψα σκοπίμως να εκθέσω τις εμπειρικές και φυσικές βάσεις της θεωρίας, ώστε να μην προκαλέσω σύγχυση στους αμύητους στη Φυσική αναγνώστες. Ελπίζω το βιβλιαράκι αυτό να προσφέρει σε πολλούς μερικές ευχάριστες και ενδιαφέρουσες ώρες.

A. Einstein

ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ – Η ΕΙΔΙΚΗ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Η φυσική και οι νόμοι της γεωμετρίας

Όποιος αποφασίσει να διαβάσει το έργο μου έχει αναμφίβολα εξοικειωθεί σε νεαρή ηλικία με το μεγαλειώδες κατασκεύασμα της ευκλείδειας γεωμετρίας και η ανάμνηση αυτής της υψηλής επιστήμης –για την οποία χρειάστηκαν ώρες μύησης από ευσυνείδητους καθηγητές– ξυπνά μέσα του μάλλον το συναίσθημα του σεβασμού παρά της ευχαρίστησης. Επιπροσθέτως, θα αντιμετώπιζε με τη βαθύτερη δυνατή περιφρόνηση οποιονδήποτε τολμούσε να αμφισβητήσει και την παραμικρή πρόταση της εν λόγω επιστήμης. Αυτή η αίσθηση όμως της απόλυτης βεβαιότητας θα τον εγκατέλειπε ενδεχομένως εάν του θέταμε το ακόλουθο ερώτημα: «Τι εννοείτε λέγοντας ότι οι προτάσεις αυτές αληθεύουν;» Ας σταθούμε σε αυτή την ερώτηση.

Η γεωμετρία προκύπτει από ορισμένες θεμελιώδεις έννοιες –όπως το επίπεδο, το σημείο, η ευθεία γραμμή– για τις οποίες έχουμε μια περισσότερο ή λιγότερο σαφή αντίληψη. Προκύπτει επίσης από ορισμένες απλές προτάσεις (αξιώματα) που μας φαίνονται *αληθείς*, δεδομένης της αντίληψης που έχουμε για τις έννοιες αυτές. Στη συνέχεια όλες οι υπόλοιπες προτάσεις αποδεικνύονται με αναγωγή σε αυτά τα αξιώματα, ακολουθώντας μια λογική μέθοδο της οποίας την αξία έχουμε υποχρεωθεί να αναγνωρίσουμε. Μια πρόταση είναι άρα ακριβής, δηλαδή αληθής, όταν συνάγεται από αυτά τα αξιώματα με βάση αυτή τη γενικά αποδεκτή μέθοδο. Το να εξετάζουμε την αλήθεια των διαφόρων θεωρημάτων της γεωμετρίας ισοδυναμεί επομένως με το να εξετάζουμε την *αλήθεια* των αξιωμάτων. Γνωρίζουμε όμως από καιρό ότι η τελευταία αυτή αλήθεια όχι μόνο δεν μπορεί να καταδειχθεί με τις μεθόδους της γεωμετρίας αλλά και ότι δεν έχει κανένα νόημα από μόνη της. Έτσι, δεν είναι δυνατόν να αναρωτιόμαστε εάν από δύο σημεία περνάει μόνο μία ευθεία γραμμή· μπορούμε μονάχα να πούμε ότι η ευκλείδεια γεωμετρία πραγματεύεται σχήματα που ονομάζονται *ευθείες γραμμές*, στα οποία αποδίδει την ιδιότητα ότι είναι εξ ολοκλήρου καθοριζόμενα από δύο από τα σημεία τους.[1] Η ιδέα την οποία εκφράζει η λέξη αληθής δεν αρμόζει στις διακηρύξεις της καθαρής γεωμετρίας, επειδή συνηθίζουμε να ορίζουμε με τη λέξη αυτή ό,τι αντιστοιχεί σε πραγματικά αντικείμενα. Η γεωμετρία δεν ασχολείται με τις σχέσεις ανάμεσα σε αυτές τις έννοιες και τα πειραματικά στοιχεία· ασχολείται αποκλειστικά με τη λογική αλληλουχία αυτών των εννοιών μεταξύ τους.

Είναι εύκολο να εξηγήσουμε γιατί παρά ταύτα τείνουμε να θεωρούμε αληθείς τις προτάσεις της γεωμετρίας. Υπάρχουν στη φύση αντικείμενα που απαντούν με περισσότερη ή λιγότερη ακρίβεια στις γεωμετρικές έννοιες και τα οποία, αναμφίβολα, γέννησαν αυτές τις έννοιες. Η γεωμετρία πασχίζει να απομακρυνθεί από αυτή την αρχή, προκειμένου να περιορίσει κατά το δυνατόν το οικοδόμημά της στο πεδίο της λογικής. Είναι, για παράδειγμα, βαθιά ριζωμένη μέσα μας η συνήθεια να ορίζουμε μία ευθεία ως προς δύο σημεία πάνω σε ένα πραγματικό στερεό σώμα. Έχουμε ομοίως συνηθίσει να θεωρούμε ότι τρία σημεία βρίσκονται πάνω σε μία ευθεία γραμμή, όταν είμαστε σε θέση να κάνουμε μια οπτική γωνία να διέλθει από αυτά τα τρία σημεία αφότου επιλέξουμε κατάλληλα το οπτικό σημείο.

Ωστόσο, και πάντοτε σύμφωνα με τις συλλογιστικές μας συνήθειες, ας επιχειρήσουμε να προσθέσουμε στις προτάσεις τις ευκλείδειας γεωμετρίας την ακόλουθη και μόνον πρόταση:

Μεταξύ δύο σημείων ενός πραγματικού στερεού σώματος αναλογεί πάντοτε η ίδια απόσταση (μετρημένη σε ευθεία γραμμή) όποιες κι αν είναι οι διαφορετικές θέσεις που καταλαμβάνει το σώμα αυτό.

Μετατρέπουμε επομένως τις προτάσεις της ευκλείδειας γεωμετρίας σε προτάσεις που αναφέρονται στις διαφορετικές σχετικές θέσεις που μπορούν να καταλάβουν τα πραγματικά στερεά σώματα. Η κατ' αυτόν τον τρόπο

---

1. Η ευκλείδεια γεωμετρία στηρίζεται σε μια σειρά αξιωμάτων, όπου και το περίφημο πέμπτο αξίωμα του Ευκλείδη: από ένα σημείο δεν μπορεί να περάσει παρά μόνον μία παράλληλος σε μία δεδομένη ευθεία. Επί είκοσι αιώνες, πολυάριθμοι μαθηματικοί επιχείρησαν να συνάγουν αυτό το αξίωμα βάσει άλλων που είχαν τεθεί προηγουμένως· όλοι τους απέτυχαν, προέκυψαν όμως μη ευκλείδειες γεωμετρίες. Η πρώτη είναι αυτή του Λομπατσέφσκι (1792-1856) που έθεσε ως αξίωμα ότι από ένα σημείο μπορούν να περάσουν πολλές παράλληλοι σε μία ευθεία. Έπειτα ακολούθησε η γεωμετρία του Ρίμαν (1826-1866) που θέτει ότι από ένα σημείο δεν μπορεί να περάσει καμία παράλληλος σε μία ευθεία. Οι γεωμετρίες αυτές αναπτύσσονται με την ίδια ακρίβεια όπως και η ευκλείδεια, αλλά τα σχήματα έχουν εδώ διαφορετικές ιδιότητες. Έτσι, στη γεωμετρία του Λομπατσέφσκι, το άθροισμα των γωνιών ενός τριγώνου είναι μικρότερο από τις δύο ορθές γωνίες, ενώ στη γεωμετρία του Ρίμαν είναι μεγαλύτερο από δύο ορθές γωνίες. Οι γεωμετρίες αυτές κέρδισαν τον θαυμασμό των ειδικών για την ακρίβεια και την τολμηρότητα της διατύπωσής τους, αλλά σε έναν πρώτο χρόνο θεωρήθηκε ότι δεν είναι παρά παιχνίδια του πνεύματος χωρίς έρεισμα επί της πραγματικότητας. Με τη θεωρία της σχετικότητας ανακαλύφθηκε ότι το φυσικό σύμπαν στο σύνολό του δεν μπορούσε να περιγραφεί επακριβώς από την ευκλείδεια γεωμετρία αλλά από εκείνη του Ρίμαν.

συμπληρωμένη γεωμετρία μπορεί να θεωρηθεί ένας κλάδος της φυσικής. Δικαιούμαστε τώρα να αναρωτηθούμε εάν, έτσι ερμηνευμένες, αυτές οι γεωμετρικές προτάσεις αληθεύουν, καθώς μπορούμε να εξετάσουμε εάν επαληθεύονται από αυτά τα πραγματικά αντικείμενα που αντιστοιχίσαμε στις αμιγώς γεωμετρικές έννοιες. Κατά προσέγγιση, μπορούμε να πούμε ότι μια γεωμετρική πρόταση είναι αληθής εάν οδηγεί σε μια δυνατή κατασκευή με κανόνα και διαβήτη.[2]

Η βεβαιότητα της κατ' αυτόν τον τρόπο αντιλαμβανόμενης αλήθειας των γεωμετρικών προτάσεων δεν μπορεί φυσικά να στηρίζεται παρά σε αρκετά ατελή πειράματα. Κατ' αρχάς θα δεχτούμε την αλήθεια αυτών των γεωμετρικών προτάσεων και στο τελευταίο μέρος των λίγων αυτών σκέψεων (μελετώντας τη θεωρία της γενικής σχετικότητας) θα δούμε ότι αυτή η αλήθεια δεν είναι απόλυτη και θα διευκρινίσουμε τα όριά της.

2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Το σύστημα των συντεταγμένων

Χάρη στη φυσική ερμηνεία της απόστασης, την οποία μόλις καταδείξαμε, μπορούμε να συνάγουμε με ακρίβεια από τα μέτρα που διαθέτουμε την απόσταση δύο σημείων ενός στερεού σώματος. Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε μία ευθεία (μικρή ράβδος S) την οποία θα καθορίσουμε εξαρχής και η οποία θα μας χρησιμεύσει ως μονάδα μέτρησης. Με δεδομένα δύο σημεία A και B ενός στερεού σώματος, μπορούμε να κατασκευάσουμε –σύμφωνα με τους νόμους της γεωμετρίας– την ευθεία γραμμή που τα ενώνει. Στη συνέχεια μπορούμε, πάνω σε αυτή την ευθεία γραμμή, να φέρουμε από το σημείο A το μήκος S όσες φορές χρειάζεται ώστε να φτάσει το σημείο B. Ο αριθμός αυτός αντιπροσωπεύει τη μέτρηση του ευθύγραμμου τμήματος AB. Σε αυτή την αρχή στηρίζεται κάθε μέτρηση μήκους.[3]

Προκειμένου να ορίσουμε μέσα στον χώρο τη θέση ενός αντικειμένου ή τον τόπο όπου συνέβη το τάδε ή το δείνα γεγονός, δηλώνουμε το σημείο του στερεού σώματος (σύστημα αναφοράς) που συμπίπτει με αυτό το αντικείμενο. Δεν λειτουργούμε έτσι μονάχα στον επιστημονικό τομέα αλλά και στην καθημερινή ζωή. Ας προ-

---

2. Σημειωτέον ότι δεν μπορούμε, παραδείγματος χάριν, να διαιρέσουμε μία γωνία σε τρεις ίσες γωνίες με κανόνα και διαβήτη.
3. Αυτό προϋποθέτει ότι η προηγούμενη μέτρηση δίνει ακριβώς έναν ακέραιο αριθμό. Ξεπερνάμε αυτή τη δυσκολία εφαρμόζοντας τους κλασματικούς κανόνες, η εισαγωγή των οποίων δεν χρήζει καμίας νέας μεθοδολογικής αρχής.

σπαθήσουμε με τον ίδιο τρόπο να αναλύσουμε τον προσδιορισμό του ακόλουθου τόπου: *Στην Αθήνα, στην πλατεία Ομονοίας.* Το έδαφος παριστά το σύστημα αναφοράς και πάνω στο έδαφος βρίσκεται ένα σημείο που δηλώνεται με την ονομασία *Πλατεία Ομονοίας στην Αθήνα*, με το οποίο το γεγονός συμπίπτει στον χώρο.

Αυτός ο στοιχειώδης τρόπος προσδιορισμού ενός τόπου δεν μπορεί να χρησιμεύσει παρά μόνον για σημεία στην επιφάνεια των στερεών σωμάτων και συνδέεται με την ύπαρξη –πάνω σε αυτό το σώμα– διακριτών μεταξύ τους σημείων. Ας εξετάσουμε πώς το ανθρώπινο πνεύμα ξεφεύγει από αυτούς τους δύο περιορισμούς δίχως να τροποποιεί την έννοια του προσδιορισμού του τόπου. Ας υποθέσουμε, λόγου χάρη, ότι ένα σύννεφο βρίσκεται πάνω από την πλατεία Ομονοίας. Μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θέση του σε σχέση με την επιφάνεια της Γης, υψώνοντας κατακόρυφα στην πλατεία ένα κοντάρι που φτάνει ως το σύννεφο. Το μήκος του κονταριού, μετρημένο με τη μονάδα του μήκους προσαρμοσμένη στην ένδειξη του τόπου στη βάση αυτού του κονταριού, ορίζει πλήρως τη θέση του σύννεφου. Βλέπουμε με αυτό το παράδειγμα πώς τελειοποιήθηκε η έννοια του τόπου:

α. Επιμηκύνουμε το στερεό σώμα, που χρησιμοποιήθηκε ως σύστημα αναφοράς, έτσι ώστε να το συναντά το προσδιοριζόμενο αντικείμενο σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

β. Για να χαρακτηρίσουμε έναν τόπο, χρησιμοποιούμε, αντί για ονόματα συγκεκριμένων σημείων, έναν αριθμό (εδώ το μήκος του κονταριού, μετρημένο με τον βαθμολογημένο κανόνα).

γ. Κάνουμε λόγο για το ύψος του σύννεφου, ακόμα κι αν δεν υπάρχει κοντάρι που να το φτάνει. Στην περίπτωσή μας, θα εκτιμήσουμε το μήκος που πρέπει να δοθεί σε ένα ανάλογο κοντάρι με τη βοήθεια οπτικών παρατηρήσεων του σύννεφου από διαφορετικά σημεία του εδάφους και βασιζόμενοι στις ιδιότητες της διάδοσης του φωτός.[4]

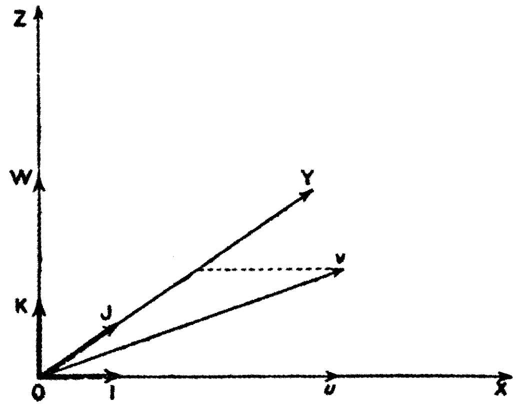
Από τα παραπάνω συνάγεται ότι θα ήταν καλό, κάθε φορά που θα ήταν δυνατόν, να χρησιμοποιούμε *αριθμούς μέτρησης* για να προσδιορίσουμε έναν τόπο. Θα μπορούμε έτσι να τον προσδιορίζουμε ανεξάρτητα από τα κατονομασμένα σημεία που ενδεχομένως υφίστανται στο στερεό σώμα που χρησιμεύει ως σύστημα αναφοράς. Η φυσική πέτυχε αυτό τον σκοπό χάρη στη χρήση των καρτεσιανών συντεταγμένων.

Το σύστημα των συντεταγμένων περιλαμβάνει τρία επίπεδα κάθετα ανά δύο και συνδεόμενα με κάποιο στερεό σώμα. Ορίζουμε τον τόπο οποιουδήποτε γεγονότος βάσει αυτού του συστήματος συντεταγμένων, δίνοντας τα μήκη των τριών καθέτων ή συντεταγμένων (x, y, z) (σχ.1) που γίνεται να περάσουν από αυτό το σημείο στα τρία

---

4. Λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη την τιμή, μεγάλη αλλά πεπερασμένη, της ταχύτητας της διάδοσης του φωτός.

προκείμενα επίπεδα. Είμαστε σε θέση να μετρήσουμε τις τρεις αυτές συντεταγμένες με τη βοήθεια ράβδων ακριβείας, ακολουθώντας τους νόμους και τις μεθόδους που υπαγορεύει η ευκλείδεια γεωμετρία.



Σχήμα 1

Στην πράξη όμως, δεν είναι διαθέσιμα εν γένει τα τρία στερεά επίπεδα που αποτελούν το σύστημα των συντεταγμένων, όπως επίσης οι συντεταγμένες δεν υπολογίζονται με τη βοήθεια ράβδων ακριβείας αλλά προσδιορίζονται με έμμεσο τρόπο. Ωστόσο δεν πρέπει ποτέ να παραβλέπουμε αυτή τη φυσική σημασία του προσδιορισμού του τόπου, διακινδυνεύοντας να συσκοτίσουμε τα συμπεράσματα της αστρονομίας και της φυσικής.[5]

Οποιοσδήποτε άρα προσδιορισμός της θέσης ενός γεγονότος μέσα στον χώρο απαιτεί τη χρήση ενός στερεού σώματος ως προς το οποίο προσδιορίζεται η θέση του γεγονότος. Ο προσδιορισμός αυτός προϋποθέτει ότι οι νόμοι της ευκλείδειας γεωμετρίας είναι εφαρμόσιμοι στις αποστάσεις, δηλαδή ότι η απόσταση μπορεί να παρασταθεί φυσικά με δύο σημεία ορισμένα σε ένα στερεό σώμα.

3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Ο χώρος και ο χρόνος στην κλασική μηχανική

Μπορούμε να διατυπώσουμε τον σκοπό της μηχανικής, χωρίς μακροσκελείς επισημάνσεις και εισαγωγικές επεξηγήσεις, με τον ακόλουθο τρόπο: η μηχανική μελετά τις μετατοπίσεις των σωμάτων στον χώρο σε συνάρτηση με τον χρόνο. Με τη διατύπωση αυτή, όμως, αμαρτάνουμε πολλαπλά σε βάρος του αγίου πνεύματος της σαφήνειας, και αμέσως θα εξηγήσω τι εννοώ.

5. Η γενική θεωρία της σχετικότητας τροποποιεί και τελειοποιεί αυτόν τον προσδιορισμό ενός τόπου.

Οι έννοιες του τόπου (ή της θέσης) και του χρόνου είναι ελάχιστα σαφείς στο σημείο αυτό. Ας πάρουμε ένα παράδειγμα: από το παράθυρο ενός βαγονιού κάποιου τρένου που κινείται με μια ομαλή κίνηση αφήνω να πέσει μια πέτρα χωρίς να της δώσω αρχική ταχύτητα. Αφήνοντας κατά μέρους την αντίσταση του αέρα, βλέπω την πέτρα να πέφτει ευθύγραμμα. Ένας πεζός που, από τον δρόμο, παρατηρεί το ίδιο γεγονός, διαπιστώνει ότι η πέτρα πέφτει διαγράφοντας μια παραβολή. Οι διαφορετικές θέσεις που λαμβάνει διαδοχικά η πέτρα βρίσκονται, στην πραγματικότητα, σε ευθεία ή σε παραβολή; Επιπλέον, τι εννοούμε εδώ λέγοντας κίνηση μέσα στον χώρο; Η απάντηση είναι άμεση σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του δεύτερου κεφαλαίου. Κατ' αρχάς, ας αφήσουμε εντελώς κατά μέρος την τόσο σκοτεινή έκφραση «μέσα στον χώρο» που –ας μην γελιόμαστε– δεν σημαίνει τίποτε απολύτως. Ας την αντικαταστήσουμε καλύτερα με την έκφραση «κίνηση σε σχέση με ένα στερεό σώμα». Ο τρόπος με τον οποίο ορίζουμε έναν τόπο σε σχέση με δύο συστήματα αναφοράς –βαγόνι ή δρόμος– εξηγήθηκε διεξοδικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αντικαθιστώντας το σύστημα αναφοράς με τη μαθηματική έννοια του συστήματος συντεταγμένων, μπορούμε να πούμε: η πέτρα διαγράφει μια ευθεία γραμμή αναφορικά με άξονες συντεταγμένων σταθερά συνδεδεμένων με το βαγόνι του τρένου και μια παραβολή αναφορικά με άξονες συντεταγμένων σταθερά συνδεδεμένων με το έδαφος. Το προκείμενο παράδειγμα δείχνει ότι δεν μπορούμε να κάνουμε λόγο για καθαυτή τροχιά αλλά μονάχα για τροχιά αναφορικά με ένα δεδομένο σύστημα αναφοράς.

Η κίνηση όμως δεν προσδιορίζεται επακριβώς παρά μόνον εάν ορίσουμε τη θέση του κινητού σε συνάρτηση με τον χρόνο, δηλαδή όταν γνωρίζουμε σε ποια στιγμή το κινητό βρίσκεται σε κάθε σημείο της τροχιάς. Τα δεδομένα αυτά πρέπει να συμπληρωθούν από έναν ορισμό του χρόνου που θα επιτρέπει να θεωρήσουμε, χάρη σε αυτόν, τις τιμές του χρόνου ως μεγέθη υποκείμενα κατ' αρχήν στην παρατήρηση (ως αποτελέσματα μετρήσεων). Στο παράδειγμα που μας απασχολεί πληρούμε αυτόν τον όρο με τον εξής τρόπο: Σύμφωνα με τις βάσεις της κλασικής μηχανικής, φανταζόμαστε δύο απολύτως όμοια ρολόγια· ο παρατηρητής στο παράθυρο του βαγονιού κοιτάζει το ένα από τα δύο ρολόγια και ο παρατηρητής στον δρόμο κοιτάζει το άλλο. Ο καθένας τους, όταν το ρολόι του δείξει μια συγκεκριμένη ώρα, προσδιορίζει τη θέση της πέτρας σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του. Με τον τρόπο αυτό καταργούμε την ανακρίβεια που εισάγει η τελική τιμή της ταχύτητας της διάδοσης του φωτός. Θα επανέλθουμε διεξοδικότερα στο ζήτημα, καθώς και σε μια δεύτερη δυσκολία που δεν έχουμε ακόμη αναφέρει.

4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Το σύστημα συντεταγμένων του Γαλιλαίου[6]

Η αρχή της μηχανικής του Νεύτωνα και του Γαλιλαίου που ονομάζεται αρχή της αδράνειας είναι ευρέως γνωστή: **ένα σώμα μεμονωμένο μέσα στον χώρο είτε αδρανεί είτε κινείται ευθύγραμμα και ομαλά**. Η πρόταση αυτή δεν αφορά αποκλειστικά την κίνηση των σωμάτων αλλά και την επιλογή των συστημάτων αναφοράς ή συντεταγμένων που θα μπορούν να χρησιμοποιούνται έγκυρα σε αυτή τη μηχανική. Η αρχή της αδράνειας μπορεί βέβαια να εφαρμοστεί κατά προσέγγιση στους απλανείς αστέρες. Σε σχέση όμως με ένα σύστημα συντεταγμένων αναπόσπαστα συνδεδεμένων με τη Γη, ένας απλανής αστέρας διαγράφει σε μια (αστρονομική[7]) ημέρα έναν κύκλο εξαιρετικά μεγάλης ακτίνας, γεγονός που αντιβαίνει την αρχή της αδράνειας. Για να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε αυτή την αρχή, πρέπει λοιπόν να αναγάγουμε τις κινήσεις σε συστήματα συντεταγμένων, αναφορικά με τα οποία οι απλανείς αστέρες δεν κινούνται κυκλικά. Ένα τέτοιο σύστημα συντεταγμένων καλείται Γαλιλαϊκό σύστημα αναφοράς. Οι νόμοι της Μηχανικής του Γαλιλαίου και του Νεύτωνα ισχύουν μονάχα για ένα τέτοιο σύστημα συντεταγμένων.

5ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Η αρχή της σχετικότητας (με την ειδική έννοια)

Ας επιστρέψουμε, για μεγαλύτερη σαφήνεια, στο παράδειγμα του τρένου που προχωρά με ομαλή ταχύτητα. Αποκαλούμε αυτή την κίνηση ομαλή μετάβαση* (*ομαλή* επειδή η ταχύτητα και η κατεύθυνση είναι σταθερές και *μετάβαση* επειδή το βαγόνι που κινείται σε σχέση με τις ράγες δεν διαγράφει καμία περιστροφική προς αυτές κίνηση). Ας υποθέσουμε τώρα ότι ένα κοράκι πετάει σε ευθεία γραμμή και με κίνηση ομαλή ως προς

---

6. Θα ήταν προτιμότερο να τιτλοφορήσουμε το παρόν κεφάλαιο *Το Γαλιλαιικό σύστημα αναφοράς*, καθώς ένα τέτοιο σύστημα που ανταποκρίνεται σε μια φυσική επιταγή μπορεί να εκφραστεί γεωμετρικά τόσο με καρτεσιανές συντεταγμένες όσο και με πολικές συντεταγμένες ή με οποιοδήποτε άλλο σύστημα συντεταγμένων.

7. Που σημαίνει αστρική, όπου η αστρική ημέρα είναι το διάστημα χρόνου που χωρίζει δύο διαδοχικά περάσματα του ίδιου αστέρα από τον ίδιο μεσημβρινό.

* (ΣτΜ) Η λέξη translation μεταφέρθηκε στα ελληνικά ως μετάβαση. Ο συγγραφέας, όπως εξηγεί άλλωστε στο κείμενο, ονομάζει μετάβαση τη μη περιστροφική κίνηση. Στα ελληνικά δεν υπάρχει αντίστοιχος, καθιερωμένος όρος σε χρήση.

έναν παρατηρητή που στέκεται στο έδαφος. Για κάποιον παρατηρητή από το τρένο, η κίνηση του κόρακα έχει διαφορετική ταχύτητα και κατεύθυνση, εξακολουθεί όμως να είναι μια ευθύγραμμη και ομαλή κίνηση. Με άλλους πιο αφηρημένους όρους, εάν ένα υλικό σημείο *m* κινείται με ευθύγραμμη και ομαλή κίνηση ως προς ένα σύστημα συντεταγμένων K, κινείται επίσης με ευθύγραμμη και ομαλή κίνηση ως προς ένα δεύτερο σύστημα συντεταγμένων K΄, εφόσον η κίνηση του K΄ σε σχέση με το K βρίσκεται σε ομαλή μετάβαση. Συνάγεται άρα από την προηγούμενη παράγραφο ότι, εάν το K είναι ένα Γαλιλαϊκό σύστημα συντεταγμένων, κάθε σύστημα συντεταγμένων K΄ που κινείται με ομαλή ευθύγραμμη κίνηση ως προς το K είναι ομοίως ένα Γαλιλαϊκό σύστημα συντεταγμένων. Οι νόμοι της νευτώνειας μηχανικής ισχύουν για το K΄ όπως και για το K.

Γενικεύοντας και πάλι, εάν το K΄ αντιπροσωπεύει ένα σύστημα συντεταγμένων που κινείται με ομαλή μετάβαση ως προς το K, τα φυσικά φαινόμενα ακολουθούν τους ίδιους νόμους όποιο κι αν είναι το σύστημα K ή K΄ στο οποίο τα ανάγουμε. Αυτή είναι η επονομαζόμενη (ειδική) αρχή της σχετικότητας.

Όσο κι αν υπήρχε η πεποίθηση ότι οποιοδήποτε φυσικό φαινόμενο μπορούσε να εξηγηθεί με τη βοήθεια της κλασικής μηχανικής, ήταν αδύνατον να αμφισβητηθεί η ορθότητα αυτής της αρχής της σχετικότητας. Με τη νέα όμως ανάπτυξη της ηλεκτροδυναμικής και της οπτικής έγινε ακόμη πιο σαφές ότι η κλασική μηχανική δεν ήταν επαρκής βάση για το σύνολο της φυσικής. Η ορθότητα της αρχής της σχετικότητας άρχισε να επανεξετάζεται και δεν ήταν εύκολο να βγει κάποιο πόρισμα.

Υπάρχουν δύο γενικά στοιχεία που εξαρχής ενισχύουν την εν λόγω αρχή της σχετικότητας. Εάν η κλασική μηχανική δεν προσφέρει μια επαρκή βάση για τη θεωρητική εξήγηση όλων των φυσικών φαινομένων, πρέπει ωστόσο να της αναγνωριστεί μια μεγάλη δόση αλήθειας: όντως μας δίνει με αξιοσημείωτη ακρίβεια τις πραγματικές κινήσεις των ουράνιων σωμάτων. Η αρχή της σχετικότητας οφείλει άρα να είναι κατά μεγάλη προσέγγιση αληθής, τουλάχιστον στον τομέα της μηχανικής. Φαίνεται ελάχιστα πιθανό *εκ προοιμίου* μια τόσο γενικευμένη αρχή να είναι έγκυρη για μια ολόκληρη σειρά φαινομένων και εσφαλμένη κατά τα άλλα.

Το δεύτερο επιχείρημα –στο οποίο θα επανέλθουμε στη συνέχεια– είναι το εξής: εάν η αρχή της σχετικότητας (με την ειδική έννοια) δεν ήταν έγκυρη, τα διάφορα Γαλιλαϊκά συστήματα συντεταγμένων K, K΄, K΄΄..., που κινούνται τα μεν σε σχέση με τα δε ομαλά, δεν θα ήταν ισοδύναμα για την εξήγηση των φυσικών φαινομένων. Θα τείναμε τότε να σκεφτούμε ότι οι νόμοι της φύσης θα παρουσιάζονταν με απλούστατη και φυσική μορφή, επιλέγοντας ως σύστημα αναφοράς, ένα από όλα τα συστήματα συντεταγμένων, το Ko, που κινείται με ορισμένη κίνηση. Σωστά τότε θα υποστηρίζαμε ότι το σύστημα Ko είναι εντελώς ακίνητο, ενώ τα άλλα συστήματα του Γαλιλαίου K σε κίνηση. Εάν, για παράδειγμα, οι ράγες του σιδηρόδρομου αντιπροσώπευαν το σύστημα Ko, το βαγόνι θα αποτελούσε ένα σύστημα K σε σχέση με το οποίο οι νόμοι θα ήταν λιγότερο απλοί απ' ό,τι με το σύστημα αναγωγής Κο· κι αυτό θα προέκυπτε από την κίνηση του βαγονιού Κ σε σχέση με το Κο (δηλαδή την πραγματική του κίνηση). Το μέγεθος και η κατεύθυνση της ταχύτητας του τρένου θα υπεισέρχονταν όντως στους γενικούς νόμους τους αναγόμενους στο σύστημα Κ. Θα ήταν, λόγου χάρη, δυνατό να προβλέψουμε ότι η οξύτητα του ήχου ενός σωλήνα εκκλησιαστικού οργάνου θα διέφερε ανάλογα με το αν ο άξονας του προκείμενου σωλήνα ήταν παράλληλος ή κάθετος στον άξονα ταχύτητας του τρένου. Αλλά και η Γη που κινείται ανάλογα με τον Ήλιο μπορεί να συγκριθεί με ένα βαγόνι που κινείται με ταχύτητα 30χλμ. το δευτερόλεπτο. Εάν η αρχή της σχετικότητας ήταν εσφαλμένη, θα έπρεπε να περιμένουμε ότι η διεύθυνση της στιγμιαίας ταχύτητας της Γης υπεισέρχεται στους νόμους της φύσης και, συνεπώς, τα φυσικά συστήματα συμπεριφέρονται διαφορετικά ανάλογα με τη θέση τους ως προς τη Γη. Η διεύθυνση της ταχύτητας της Γης αλλάζει πράγματι συνεχώς στη διάρκεια του έτους, εξαιτίας της κίνησής της σε τροχιά, δεν μπορεί άρα να θεωρηθεί ακίνητη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ως προς ένα υποθετικό σύστημα Κο. Ωστόσο, ποτέ δεν παρατηρήθηκε ανάλογη φυσική ανισορροπία του χώρου, δηλαδή διαφορά ιδιοτήτων, από φυσικής πλευράς, ανάμεσα στις διάφορες διευθύνσεις. Τούτο συνιστά ένα ιδιαιτέρως βαρύνον επιχείρημα υπέρ της αρχής της σχετικότητας.

6ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Το θεώρημα της σύνθεσης των ταχυτήτων σύμφωνα με την κλασική μηχανική

Υποθέτουμε πάντα ότι το ίδιο τρένο κινείται με τη σταθερή ταχύτητα v. Ας υποθέσουμε ακόμη ότι ένας επιβάτης μετακινείται κατά μήκος του βαγονιού, κι άρα κατά τη διεύθυνση του συρμού, με μια ταχύτητα w. Ποια είναι η ταχύτητά του W ως προς τις ράγες του σιδηροδρόμου; Η μόνη δυνατή απάντηση μοιάζει να απορρέει από την ακόλουθη σκέψη: εάν ο ταξιδιώτης έστεκε ακίνητος για ένα δευτερόλεπτο, θα μετακινούνταν στο διάστημα αυτό ως προς τις ράγες σε απόσταση v ίση με την ταχύτητα του τρένου. Στην πραγματικότητα όμως, εξαιτίας της ίδιας του της κίνησης διανύει επιπλέον σε αυτό το δευτερόλεπτο, σε σχέση με το βαγόνι κι άρα σε σχέση με τις ράγες, μια απόσταση w ίση με την ταχύτητα του βαδίσματός του. Συνολικά, διανύει επομένως σε αυτό το δευτερόλεπτο ως προς τις ράγες μια απόσταση:

$$W = v + w$$

Θα δούμε παρακάτω ότι αυτός ο συλλογισμός, που στην κλασική μηχανική ονομάζεται θεώρημα της σύνθεσης των ταχυτήτων, δεν ευσταθεί κι ότι, επομένως, το θεώρημα δεν επαληθεύεται στην πραγματικότητα. Προς στιγμήν, όμως, ας υποθέσουμε ότι στέκει.

7ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Φαινομενική ασυμβατότητα του νόμου της διάδοσης του φωτός και της αρχής της σχετικότητας

Κανένας φυσικός νόμος δεν φαντάζει πιο απλός από εκείνον της διάδοσης του φωτός στο κενό. Οποιοσδήποτε μαθητής ξέρει ή νομίζει ότι ξέρει πως η διάδοση αυτή είναι ευθύγραμμη και πραγματοποιείται με ταχύτητα 300.000 χλμ. το δευτερόλεπτο. Όπως και να 'χει, γνωρίζουμε με βεβαιότητα ότι η ταχύτητα αυτή είναι η ίδια για όλα τα χρώματα·* εάν δεν ίσχυε αυτό, η ελάχιστη λάμψη ενός απλανούς αστέρα τη στιγμή της έκλειψής του από κάποιον δορυφόρο[8] του δεν θα παρατηρούνταν ταυτόχρονα για όλα τα χρώματα. Ένας ανάλογος συλλογισμός που προέκυψε από την παρατήρηση των διπλών αστέρων επέτρεψε στον Ολλανδό αστρονόμο Ντε Σίτερ να δείξει ότι η ταχύτητα της διάδοσης του φωτός δεν μπορούσε να εξαρτάται από την ταχύτητα μετατόπισης της φωτεινής πηγής. Θεώρησε εξίσου αναληθοφανές αυτή η ταχύτητα διάδοσης να εξαρτάται από τη διεύθυνσή της μέσα στον χώρο.

Ας υποθέσουμε λοιπόν, όπως θα έκανε κι ο μαθητής με τον οποίο ξεκινήσαμε, ότι το φως διαδίδεται με μια σταθερή ταχύτητα μέσα στο κενό. Ποιος θα μπορούσε να σκεφτεί ότι αυτός ο απλός νόμος ενέπλεξε τον ευσυνείδητο ερευνητή στις πλέον ανυπέρβλητες δυσκολίες; Ας δούμε εν συντομία πώς έχουν τα πράγματα.

Οφείλουμε φυσικά να μελετήσουμε τη διάδοση του φωτός, όπως οποιαδήποτε άλλη κίνηση, ανάγοντάς την σε ένα σταθερό σύστημα αναφοράς (σύστημα συντεταγμένων). Ας επιλέξουμε για τον σκοπό αυτό τη σιδηροδρομική μας γραμμή που υποθέτουμε ότι είναι τοποθετημένη σε ένα τέλειο κενό. Μια φωτεινή ακτίνα, που στέλνεται κατά μήκος των γραμμών, διαδίδεται σε σχέση με αυτή με μια ταχύτητα c. Φανταζόμαστε πάντοτε το ίδιο τρένο να κινείται με την ταχύτητα v προς την ίδια κατεύθυνση με εκείνη της διάδοσης του φωτός. Η ταχύτητα v θα είναι φυσικά πολύ μικρότερη από τη c. Ποια είναι η ταχύτητα της διάδοσης της φωτεινής ακτίνας σε σχέση με το βαγόνι του τρένου; Ο συλλογισμός της προηγούμενης παραγράφου εφαρμόζεται βεβαίως εδώ· για την ακρίβεια, ο επιβάτης που μετακινείται μέσα στο τρένο παίζει τον ρόλο της φωτεινής ακτίνας. Αρκεί να θεωρήσουμε, αντί για την ταχύτητα W του επιβάτη σε σχέση με τις ράγες, την ταχύτητα της διάδοσης του φωτός σε σχέση με αυτές, κι όπου w είναι η ζητούμενη ταχύτητα διάδοσης του φωτός σε σχέση με το βαγόνι, ταχύτητα που δίδεται ως:

$$w = c - v$$

---

8. Η επιλογή του όρου δορυφόροι δεν είναι επιτυχής. Πρόκειται για μια νύξη είτε στα διπλά είτε και πολλαπλά αστρικά συστήματα όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε οπτικά το πέρασμα ενός αστέρα μπροστά από έναν άλλο, είτε στο πέρασμα ενός πλανήτη του ηλιακού συστήματος μπροστά από έναν αστέρα.

* (ΣτΜ) Εδώ εννοείται το κενό.

Βλέπουμε επομένως ότι αυτή η ταχύτητα διάδοσης είναι μικρότερη από τη c.

Αυτό το αποτέλεσμα όμως αντιβαίνει την αρχή της σχετικότητας που διατυπώθηκε στο πέμπτο κεφάλαιο. Σύμφωνα με εκείνη, ο νόμος της διάδοσης του φωτός –όπως και κάθε άλλος νόμος– θα έπρεπε να είναι ο ίδιος, είτε επιλέξουμε ως σύστημα αναφοράς το βαγόνι του συρμού είτε τις ράγες του. Κάτι τέτοιο όμως στέκει αδύνατον σύμφωνα με όσα εξηγήσαμε μόλις πριν· εάν η φωτεινή ακτίνα διαδίδεται σε σχέση με τις ράγες με ταχύτητα v, τότε υποχρεωτικά η ταχύτητά του σε σχέση με το βαγόνι θα είναι διαφορετική, γεγονός που αντίκειται στην αρχή της σχετικότητας.

Φαίνεται άρα ότι δεν μπορούμε να ξεφύγουμε από το ακόλουθο δίλημμα: να απορρίψουμε είτε την αρχή της σχετικότητας είτε τον απλό κανόνα της διάδοσης του φωτός. Πιθανότατα ο αναγνώστης που παρακολούθησε προσεκτικά όσα προαναφέρθηκαν θα περιμένει ότι θα εμμείνουμε στην αρχή της σχετικότητας που φαντάζει τόσο απλή και φυσική στο πνεύμα, αρκεί να αντικαταστήσουμε τον νόμο της διάδοσης του φωτός στο κενό με έναν συνθετότερο νόμο, συμβατό με την αρχή της σχετικότητας. Η ανάπτυξη όμως της θεωρητικής φυσικής θα δείξει ότι μια τέτοια οδός δεν είναι βατή. Οι τόσο γόνιμες θεωρητικές έρευνες του Χ. Α. Λόρεντς[9] πάνω στα οπτικά και ηλεκτροδυναμικά φαινόμενα που παρουσιάζουν τα κινούμενα σώματα έδειξαν ότι οι εμπειρίες μας σε αυτόν τον τομέα οδηγούν υποχρεωτικά σε μια θεωρία των ηλεκτροδυναμικών φαινομένων, η οποία συνεπάγεται απαρέγκλιτα τον νόμο της σταθερότητας της ταχύτητας του φωτός στο κενό. Γι' αυτόν τον λόγο οι κορυφαίοι θεωρητικοί έκλιναν περισσότερο στο να απορρίπτουν την αρχή της σχετικότητας, παρόλο που δεν βρέθηκε ποτέ εμπειρικό παράδειγμα που να την διαψεύδει.

Σε αυτό ακριβώς το σημείο εμφανίζεται η θεωρία της σχετικότητας. Μια σε βάθος ανάλυση των φυσικών εννοιών του χρόνου και του χώρου θα δείξει ότι στην πραγματικότητα δεν υπάρχει καμία ασυμβατότητα ανάμεσα στην αρχή της σχετικότητας και στον νόμο της διάδοσης του φωτός. Τουναντίον, οι δύο αυτοί νόμοι μαζί οδηγούν σε μια εντελώς λογική και αδιαμφισβήτητη θεωρία. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τις βασικές ιδέες αυτής της θεωρίας και θα την ονομάσουμε *ειδική θεωρία της σχετικότητας* θέλοντας να τη διακρίνουμε από τη γενικότερη θεωρία, στην οποία θα αναφερθούμε αργότερα.

---

9. Χέντρικ Άντοον Λόρεντς (1853-1928), Ολλανδός φυσικός που μοιράστηκε, το 1902, το βραβείο Νόμπελ Φυσικής με τον συμπατριώτη του Π. Ζέεμαν. Ο Λόρεντς είχε δημοσιεύσει τη θεωρία του για το ηλεκτρόνιο το 1895. Το έργο του στο οποίο αναφέρεται ο Αϊνστάιν *Ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα σε ένα κινούμενο σύστημα με ταχύτητα μικρότερη από του φωτός* δημοσιεύτηκε το 1904.

8ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Η έννοια του χρόνου στη φυσική

Υποθέτω ότι ένας κεραυνός έπεσε στις ράγες του συρμού μας, σε δύο σημεία Α και Β, σε κάποια απόσταση το ένα από το άλλο. Προσθέτω ότι οι δύο αυτές αστραπές ήταν ταυτόχρονες και σε ρωτώ, αγαπητέ αναγνώστη, η διαβεβαίωση αυτή έχει κανένα νόημα; Θα μου απαντήσεις «ναι» με βεβαιότητα. Σε παρακαλώ λοιπόν να μου εξηγήσεις καθαρότερα το νόημα αυτής της διαβεβαίωσης και θα διαπιστώσεις, μετά από λίγη σκέψη, ότι το ερώτημα δεν είναι τόσο απλό όσο φαίνεται εκ πρώτης όψεως.

Μετά από λίγη ώρα, η ακόλουθη απάντηση θα σου έρθει πιθανόν στο νου: «Η διαβεβαίωση αυτή είναι ξεκάθαρη από μόνη της και δεν απαιτεί περαιτέρω διευκρινίσεις· χρειάστηκε ωστόσο να σκεφτώ λίγο προτού βρω τον τρόπο να διαπιστώσω εμπειρικά εάν τα δύο γεγονότα ήταν ταυτόχρονα ή όχι». Η απάντηση όμως αυτή δεν μπορεί να με καλύψει για τους ακόλουθους λόγους: Ας δεχτούμε ότι ένας ικανός μετεωρολόγος έχει ανακαλύψει, μέσω λεπταίσθητων συλλογισμών, ότι ο κεραυνός πρέπει να πέφτει πάντοτε ταυτόχρονα σε δύο σημεία Α και Β· θα έμενε ακόμη να διαπιστώσουμε ότι το θεωρητικό αυτό συμπέρασμα συμβαδίζει με την πραγματικότητα. Το ίδιο ισχύει για όλες τις διαβεβαιώσεις της φυσικής όπου παρεμβαίνει η έννοια της ταυτοχρονίας ή «η έννοια του ταυτόχρονου». Η έννοια αυτή δεν υφίσταται για τον φυσικό παρά μόνον εάν έχει βρει τον τρόπο να εξακριβώσει εμπράκτως εάν δύο γεγονότα είναι ταυτόχρονα ή όχι. Ο ορισμός του ταυτόχρονου πρέπει επομένως να μας δίνει τη δυνατότητα, για παράδειγμα, να εξακριβώσουμε πειραματικά εάν οι δύο κεραυνοί του προηγούμενου παραδείγματος ήταν ταυτόχρονοι ή όχι. Όσο αυτή η συνθήκη δεν εκπληρώνεται, σφάλλουμε ως φυσικοί (κι αναμφίβολα και ως μη φυσικοί) όταν φανταζόμαστε ότι μπορούμε να δώσουμε ένα νόημα στη διαβεβαίωση περί ταυτόχρονου των δύο φαινομένων. (Πείσε τον εαυτό σου γι' αυτό, αγαπητέ αναγνώστη, προτού προχωρήσεις παρακάτω).

Θα μου προτείνετε λοιπόν τον ακόλουθο τρόπο για να διαπιστώσουμε το ταυτόχρονο των δύο γεγονότων: Μετράμε την απόσταση ΑΒ σε ευθεία γραμμή κατά μήκος των γραμμών του τρένου και τοποθετούμε στο μέσο Μ έναν παρατηρητή εφοδιασμένο με μια συσκευή (για παράδειγμα δύο καθρέπτες με κλίση 90°) που του επιτρέπει να παρατηρεί ταυτόχρονα τα δύο σημεία Α και Β. Εάν ο παρατηρητής αντιληφθεί τους δύο κεραυνούς την ίδια στιγμή, τότε αυτοί είναι ταυτόχρονοι.

Η διαδικασία αυτή με καλύπτει, κι ωστόσο δεν μου φαίνεται ότι το ερώτημα έχει διαφωτιστεί πλήρως. Ορίστε μία ένσταση: ο ορισμός αυτός θα μου φαινόταν απολύτως ορθός εάν γνώριζα ήδη ότι το φως κάνει τον ίδιο χρόνο για να διανύσει την απόσταση από το σημείο Α στο Μ και την απόσταση από το Β στο Μ, όπου Μ είναι το σημείο από το οποίο παρατηρούμε τους δύο κεραυνούς. Για να το επαληθεύσουμε όμως πρέπει να υποθέσουμε ότι διαθέτουμε ένα μέσο μέτρησης του χρόνου, κι έτσι λοιπόν μοιάζει να είμαστε παγιδευμένοι σε έναν φαύλο κύκλο.

Ύστερα από κάποια σκέψη, θα μου απαντήσετε με κάποια δικαιολογημένη απαξίωση, ότι εμμένετε στον ορισμό σας, καθότι στην πραγματικότητα δεν υποθέτει τίποτα για το φως. Η μόνη προϋπόθεση που όντως πρέπει να πληροί ο ορισμός του ταυτόχρονου είναι να παρέχει, σε κάθε πραγματική περίπτωση, μια εμπειρική διαδικασία που θα προσδιορίζει εάν πραγματοποιείται ή όχι. Αναμφίβολα ο ορισμός μου πληροί τούτη την προϋπόθεση. Το να ισχυρισθεί κανείς ότι το φως χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να διανύσει την απόσταση ΑΜ όσο και την απόσταση ΒΜ δεν αποτελεί, στην πραγματικότητα, μια υπόθεση για τη φυσική υπόσταση του φωτός αλλά μια σύμβαση την οποία δεχόμαστε ελεύθερα προκειμένου να καταλήξουμε σε έναν ορισμό του ταυτόχρονου.

Είναι σαφές ότι ο ορισμός αυτός δεν πρέπει να ισχύει μόνο για δύο γεγονότα αλλά και για έναν οποιονδήποτε αριθμό γεγονότων τα οποία συμβαίνουν σε διαφορετικά σημεία που καταλαμβάνουν τυχαίες θέσεις σε σχέση με ένα σύστημα αναφοράς[10] (εδώ οι γραμμές του τρένου). Καταλήγουμε συνεπώς σε έναν ορισμό του χρόνου στη φυσική. Ας φανταστούμε τρία πανομοιότυπα ρολόγια σε τρία σημεία Α, Β, Γ των γραμμών (σύστημα συντεταγμένων), ρυθμισμένα κατά τρόπο ώστε οι αντίστοιχες θέσεις των δεικτών τους να είναι ταυτόχρονες (με την έννοια που προσδόθηκε προηγουμένως). Εννοούμε συνεπώς ως *χρόνο*[11] ενός γεγονότος την ένδειξη (θέση του δείκτη) του αμέσως γειτονικού ρολογιού (στον χώρο). Προσδίδουμε έτσι σε κάθε γεγονός μία τιμή του χρόνου κατ' αρχήν ευδιάκριτη.

Η σύμβαση αυτή προϋποθέτει μία ακόμα φυσική υπόθεση την οποία εύκολα θα παραδεχτούμε καθότι καμία εμπειρία δεν στάθηκε ποτέ αφορμή για να την αμφισβητήσουμε. Παραδεχόμαστε πράγματι ότι όλα αυτά τα ρολόγια μετράνε τον χρόνο με τον ίδιο ρυθμό, αρκεί να είναι πανομοιότυπα. Με άλλα λόγια, εάν δύο ακίνητα ρολόγια τοποθετημένα σε δύο διαφορετικά σημεία του συστήματος αναφοράς ρυθμιστούν με τρόπο ώστε οι δείκτες τους να δείχνουν ταυτόχρονα (με την έννοια που προσδόθηκε προηγουμένως) την ίδια ώρα, το πέρασμά τους από όλες τις αντίστοιχες θέσεις θα είναι σταθερά ταυτόχρονο (με την έννοια που προσδόθηκε προηγουμένως).

---

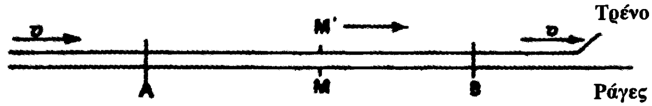
10. Πράγμα που καταλήγει στην παραδοχή της μεταβατικότητας του ταυτόχρονου. Έστω ότι Α, Β και Γ είναι τρία γεγονότα. Αν τα Α και Β είναι ταυτόχρονα και αν τα Β και Γ είναι επίσης ταυτόχρονα, τότε και τα Α και Γ είναι ταυτόχρονα.

11. Εδώ θα ήταν προτιμότερος ο όρος στιγμή

9ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Η σχετικότητα του ταυτόχρονου

Μέχρι στιγμής έχουμε αναγάγει τα πάντα σε ένα ορισμένο σύστημα αναφοράς, το οποίο ορίζουμε με τις ράγες της αμαξοστοιχίας. Ας υποθέσουμε τώρα ότι ένα εξαιρετικά μακρύ τρένο μετατοπίζεται κατά μήκος των γραμμών με ταχύτητα v κατά τη φορά που δείχνει το σχήμα 2.



Σχήμα 2

Οι επιβάτες αυτού του τρένου θα προτιμήσουν να θεωρήσουν αυτό ως σύστημα αναφοράς (σύστημα συντεταγμένων)· θα αναγάγουν όλα τα γεγονότα στο τρένο. Κάθε γεγονός που συμβαίνει σε ένα σημείο των γραμμών συμβαίνει επίσης και σε ένα ορισμένο σημείο του τρένου. Ο ορισμός του ταυτόχρονου είναι ο ίδιος σε σχέση με το τρένο και σε σχέση με τις ράγες. Ανακύπτει όμως το ακόλουθο ερώτημα:

Δύο γεγονότα (για παράδειγμα οι δύο κεραυνοί A και B) ταυτόχρονα ως προς τις γραμμές είναι επίσης ταυτόχρονα ως προς το τρένο; Θα δείξουμε παρευθύς ότι η απάντηση είναι αρνητική.

Λέγοντας ότι οι δύο κεραυνοί A και B είναι ταυτόχρονοι ως προς τις ράγες, εννοούμε το εξής: οι φωτεινές ακτίνες που εκπέμπονται από τα σημεία A και B συναντιούνται στη μέση M της απόστασης AB που μετριέται κατά μήκος των γραμμών. Αλλά στα γεγονότα A και B αντιστοιχούν επίσης σημεία A και B πάνω στο τρένο. Έστω ότι M΄ είναι το μέσο του διανύσματος AB επί του κινούμενου τρένου. Αυτό το σημείο M΄ συμπίπτει επακριβώς με το σημείο M τη στιγμή όπου παράγονται οι κεραυνοί (στιγμή που μετράται σε σχέση με τις γραμμές). Στη συνέχεια όμως μετατοπίζεται προς τα δεξιά όπως φαίνεται στο σχήμα με την ταχύτητα v του τρένου. Εάν ένας παρατηρητής ευρισκόμενος μέσα στο τρένο στο σημείο M δεν κινούταν με αυτή την ταχύτητα, θα παρέμενε συνέχεια στο σημείο M, και οι φωτεινές ακτίνες που ξεκινούν από τα σημεία A και B θα τον άγγιζαν ταυτόχρονα, θα συναντιόντουσαν δηλαδή εκεί ακριβώς που κάθεται. Στην πραγματικότητα όμως ο παρατηρητής μετακινείται (ως προς τις ράγες) και τείνει προς το φως που έρχεται προς αυτόν από το σημείο B, ενώ απομακρύνεται από το φως που έρχεται από το σημείο A. Ο παρατηρητής θα δει λοιπόν τον πρώτο κεραυνό νωρίτερα απ' ό,τι τον δεύτερο. Οι παρατηρητές που παίρνουν ως σημείο αναφοράς την αμαξοστοιχία φτάνουν στο συμπέρασμα ότι ο κεραυνός Β ήταν προγενέστερος του κεραυνού Α. Καταλήγουμε επομένως στο ακόλουθο κεφαλαιώδες συμπέρασμα:

Γεγονότα που είναι ταυτόχρονα ως προς τις γραμμές του τρένου δεν είναι πλέον ταυτόχρονα ως προς το ίδιο το τρένο και αντίστροφα (σχετικότητα του ταυτόχρονου). Κάθε σύστημα αναφοράς (σύστημα συντεταγμένων) έχει τον δικό του χρόνο· μια χρονική ένδειξη δεν έχει νόημα παρά μόνον εάν δηλώσουμε το σύστημα σύγκρισης που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του χρόνου.

Η φυσική ανέκαθεν παραδεχόταν, χωρίς να αναφέρει τίποτε σχετικά πριν τη θεωρία της σχετικότητας, ότι η έννοια του χρόνου είναι απόλυτη, δηλαδή ανεξάρτητη από την κινητική κατάσταση του συστήματος αναφοράς. Η υπόθεση αυτή όμως είναι ασύμβατη με τον προηγούμενο ορισμό του ταυτόχρονου όπως μόλις είδαμε και η αντιπαράθεση, που παρουσιάστηκε στο 7ο κεφάλαιο, μεταξύ της αρχής της σχετικότητας και του νόμου της διάδοσης του φωτός στο κενό αίρεται εάν απορρίψουμε αυτή την υπόθεση.

Η αντιπαράθεση αυτή ξεκινούσε από τον συλλογισμό του 6ου κεφαλαίου που δεν στέκει πλέον. Από το γεγονός ότι ο επιβάτης του βαγονιού διένυε σε ένα δευτερόλεπτο το μήκος w ως προς το τρένο, συμπεραίνουμε επίσης ότι σε ένα δευτερόλεπτο διένυε αυτό το μήκος ως προς τις ράγες. Σύμφωνα όμως με τις προηγούμενες παρατηρήσεις, ο χρόνος διάρκειας ενός ορισμένου γεγονότος ως προς το βαγόνι του τρένου δεν μπορεί να έχει, ως προς τις ράγες, μια ίση διάρκεια: δεν μπορούμε άρα να πούμε ότι ο επιβάτης διανύει, εξαιτίας της πορείας του ως προς τις ράγες, το μήκος w σε έναν χρόνο που, μετρημένος από τις ράγες, είναι ίσος με ένα δευτερόλεπτο.

Ο συλλογισμός του 6ου κεφαλαίου στηρίζεται ακόμα σε μια δεύτερη υπόθεση που, κατόπιν σκέψεως, φαίνεται εντελώς αυθαίρετος, παρόλο που ανέκαθεν διατυπωνόταν έμμεσα πριν την εισαγωγή της θεωρίας της σχετικότητας.

10ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Περί της σχετικότητας της έννοιας της απόστασης μέσα στον χώρο

Ας θεωρήσουμε δύο συγκεκριμένα σημεία του τρένου που κινείται με μια ταχύτητα v ως προς τις ράγες κι ας ψάξουμε την απόστασή τους. Γνωρίζουμε ήδη ότι χρησιμοποιούμε για τη μέτρηση ενός μήκους ένα σύστημα αναφοράς σε σχέση με το οποίο μετράμε αυτό το μήκος. Το απλούστερο είναι να επιλέξουμε το ίδιο το τρένο ως σύστημα αναφοράς (σύστημα συντεταγμένων). Ένας επιβάτης μετρά αυτή την απόσταση φέρνοντας σε ευθεία γραμμή κατά μήκος του δαπέδου του βαγονιού το μέτρο του αρκετές φορές ώστε ξεκινώντας από ένα συγκεκριμένο σημείο να φτάσει στο άλλο. Ο αριθμός των φορών που χρειάστηκε να επαναθέσει τον κανόνα του παριστάνει τη ζητούμενη απόσταση.

Δεν συμβαίνει πια το ίδιο εάν θέλουμε να μετρήσουμε αυτή την απόσταση σε σχέση με τις ράγες. Η ακολουθούμενη μέθοδος είναι η εξής: Ονομάζουμε Α΄ και Β΄ τα δύο σημεία του τρένου των οποίων την απόσταση θέλουμε να μετρήσουμε· κινούνται ως προς τις γραμμές του τρένου με ταχύτητα v. Ορίζουμε κατά πρώτον τα δύο σημεία Α και Β των γραμμών που συμπίπτουν με τα σημεία Α΄ και Β΄ σε μια δεδομένη στιγμή t, στιγμή που ορίζεται ως προς τις ράγες. Είναι εύκολο να πετύχουμε τα σημεία αυτά Α και Β χάρη στον ορισμό του χρόνου που δόθηκε στο 8ο κεφάλαιο. Μετράμε επομένως την απόσταση ΑΒ φέρνοντας και πάλι τη μονάδα μήκους έναν ορισμένο αριθμό φορών κατά μήκους των γραμμών.

Επ' ουδενί δεν βρίσκουμε *εκ προοιμίου* ότι το τελευταίο αυτό μέτρο θα δώσει τον ίδιο αριθμό με το πρώτο μέτρο. Το μήκος της αμαξοστοιχίας μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το αν μετριέται στις ράγες ή στο ίδιο το τρένο. Αυτό εγείρει μια δεύτερη ένσταση στον συλλογισμό, τον φαινομενικά τόσο προφανή, του 5ου κεφαλαίου. Πράγματι, εάν ο επιβάτης διανύει σε μια μονάδα χρόνου ένα μήκος ίσο με w, μετρημένο σε σχέση με το τρένο, τίποτε δεν μας λέει ότι το μήκος αυτό είναι και πάλι w, μετρημένο σε σχέση με τις ράγες του.

11ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Οι μετασχηματισμοί του Λόρεντς

Οι συλλογισμοί των τριών προηγούμενων παραγράφων μάς δείχνουν ότι η φαινομενική ασυμβατότητα του νόμου της διάδοσης του φωτός με την αρχή της σχετικότητας του 7ου κεφαλαίου απέρρεε από έναν συλλογισμό ο οποίος δανειζόταν από την κλασική μηχανική δύο ολοσχερώς αναπόδεικτες υποθέσεις:

1ον Το χρονικό διάστημα που χωρίζει δύο γεγονότα είναι ανεξάρτητο από την κινητική κατάσταση του συστήματος αναφοράς.

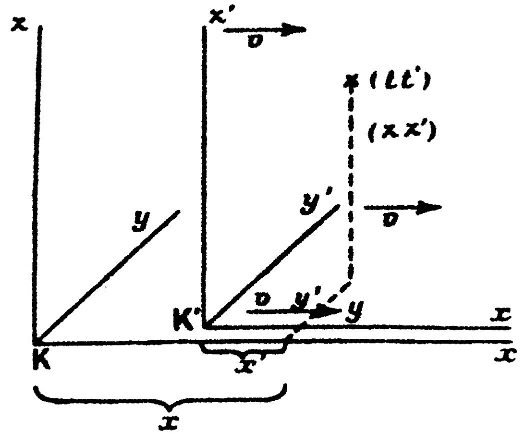
2ον Η απόσταση μέσα στον χώρο δύο σημείων ενός στερεού σώματος είναι ανεξάρτητη από την κινητική κατάσταση του συστήματος αναφοράς.

Το δίλημμα του 7ου κεφαλαίου καταργείται εάν απορρίψουμε τις δύο υποθέσεις, καθώς το θεώρημα της σύνθεσης των ταχυτήτων του 6ου κεφαλαίου παύει να αληθεύει. Διαφαίνεται, καθώς βλέπουμε, η δυνατότητα να συμβιβάσουμε τον νόμο της διάδοσης του φωτός στο κενό με την αρχή της σχετικότητας. Τότε όμως τίθεται το ερώτημα: Πώς πρέπει να τροποποιήσουμε τον συλλογισμό του 6ου κεφαλαίου για να απομακρύνουμε τη φαινομενική αντίφαση ανάμεσα σε αυτά τα δύο πειραματικά και θεμελιώδη αποτελέσματα; Το ερώτημα αυτό μας οδηγεί σε ένα δεύτερο γενικότερο. Παρατηρούμε, στο 6ο κεφάλαιο, θέσεις και χρόνους σε σχέση με το τρένο και σε σχέση με τις γραμμές του. Πώς μπορούμε να βρούμε τη θέση και τον χρόνο ενός γεγονότος ως προς το τρένο όταν γνωρίζουμε αυτές τις ποσότητες ως προς τις ράγες του τρένου; Μπορούμε να φανταστούμε μια τέτοια απάντηση ώστε ο νόμος της διάδοσης του φωτός στο κενό να μην αντιβαίνει την αρχή της σχετικότητας; Με άλλα λόγια, μπορούμε να φανταστούμε μια τέτοια σχέση ανάμεσα στη θέση και στον χρόνο ενός γεγονότος ως προς δύο συστήματα αναφοράς ώστε οποιαδήποτε φωτεινή ακτίνα να έχει την ίδια ταχύτητα διάδοσης c ως προς τις γραμμές και ως προς το τρένο; Μπορούμε με απόλυτη βεβαιότητα να απαντήσουμε καταφατικά σε αυτό το ερώτημα· μπορούμε να βρούμε έναν νόμο μετασχηματισμού, εντελώς ακριβή, που θα μας επιτρέπει να εκτιμούμε τη θέση και τον χρόνο ενός γεγονότος καθώς περνάμε από ένα σύστημα αναφοράς σε ένα άλλο.

Προτού όμως αναπτύξουμε αυτό το θέμα, θα κάνουμε την ακόλουθη παρέκβαση. Μέχρις στιγμής εξετάσαμε μονάχα γεγονότα που περνούν κατά μήκος των γραμμών του τρένου, στα οποία δίναμε, από μαθηματικής πλευράς, τις ιδιότητες μιας ευθείας γραμμής. Μπορούμε ωστόσο να σκεφτούμε ένα σύστημα αναφοράς που το παίρνουμε όπως στο 2ο κεφάλαιο και το οποίο αν το επιμηκύνουμε προς τα πάνω και προς τα πλάγια μάς επιτρέπει να εντοπίσουμε, σε σχέση με αυτό, χάρη σε ένα κατάλληλο σύστημα ράβδων, ένα γεγονός όπου κι αν συμβαίνει αυτό. Με ανάλογο τρόπο, μπορούμε να φανταστούμε ότι το τρένο που κινείται με ταχύτητα v εκτείνεται σε ολόκληρο τον χώρο, έτσι ώστε κάθε γεγονός, όσο απομακρυσμένο κι αν είναι, να μπορεί να εντοπισθεί σε σχέση με το δεύτερο σύστημα. Μπορούμε, χωρίς να κάνουμε μεγάλο λάθος, να μην λάβουμε υπόψη μας το ότι τα δύο αυτά συστήματα, εάν ήταν πραγματικά, θα καταστρέφονταν διαρκώς εξαιτίας του αδιαπέραστου των στερεών σωμάτων.

Ας φανταστούμε σε κάθε σύστημα τρία ορθογώνια επίπεδα που ονομάζονται επίπεδα συντεταγμένων (συστήματα συντεταγμένων). Στις γραμμές του τρένου αντιστοιχεί λοιπόν ένα σύστημα συντεταγμένων K και στο τρένο ένα σύστημα K′. Ένα οποιοδήποτε γεγονός προσδιορίζεται, αναφορικά με το K, ως προς τον χώρο από τα μήκη των τριών καθέτων x, y, z που φέρονται πάνω στα επίπεδα συντεταγμένων και ως προς τον χρόνο από μια τιμή χρόνου t. Το ίδιο γεγονός προσδιορίζεται με τον ίδιο τρόπο ως προς ένα K′ από τις αντίστοιχες ποσότητες x′, y′, z′, οι οποίες δεν συμπίπτουν φυσικά με τα x, y, z, t. Εξηγήσαμε ήδη λεπτομερώς πώς τα μεγέθη αυτά πρέπει να θεωρηθούν ως το αποτέλεσμα φυσικών μετρήσεων.

Κατά έναν συγκεκριμένο τρόπο, το πρόβλημά μας διατυπώνεται ως εξής: Ανάλογα με τις τιμές x, y, z, t που χαρακτηρίζουν ένα γεγονός ως προς το K, ποιες είναι οι τιμές των ποσοτήτων x΄, y΄, z΄, t που χαρακτηρίζουν το γεγονός ως προς το K΄; Οι σχέσεις πρέπει να επιλεγούν κατά τρόπο που να επαληθεύεται ο νόμος της διάδοσης του φωτός στο κενό, σε σχέση με το K και το K΄, για μία και συγκεκριμένη φωτεινή ακτίνα επιλεγμένη από το υπόλοιπο με τρόπο απόλυτα τυχαίο. Η λύση αυτού του προβλήματος βρίσκεται με τις ακόλουθες εξισώσεις με τη σχετική κατεύθυνση των συστημάτων συντεταγμένων όπως φαίνεται από το σχήμα 3:



Σχήμα 3

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

σύστημα εξισώσεων που ονομάζεται *μετασχηματισμοί του Λόρεντς*.

Εάν είχαμε πάρει ως βάση τις άρρητες υποθέσεις της παλαιάς μηχανικής σχετικά με τον απόλυτο χαρακτήρα του χρόνου και των μηκών και όχι τον νόμο της διάδοσης του φωτός, θα είχαμε καταλήξει στο ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$x' = x - v.t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

που ονομάζεται *Γαλιλαϊκοί μετασχηματισμοί*. Οι μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου μπορούν να θεωρηθούν ως το όριο των μετασχηματισμών του Λόρεντς όταν η ταχύτητα του φωτός c γίνεται άπειρη.

Εύκολα διαπιστώνουμε, σύμφωνα με το ακόλουθο παράδειγμα, ότι χάρη στον μετασχηματισμό του Λόρεντς ο νόμος της διάδοσης του φωτός στο κενό επαληθεύεται τόσο για το σύστημα αναφοράς Κ όσο και για το σύστημα αναφοράς Κ΄. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε στείλει ένα φωτεινό σήμα κατά μήκος του άξονα των x και ότι διαδίδεται σύμφωνα με τον νόμο:

$$x = c \cdot t$$

δηλαδή με την ταχύτητα c. Αυτή η απλή σχέση ανάμεσα στο x και στο t συνεπάγεται, σύμφωνα με τις εξισώσεις μετασχηματισμού του Λόρεντς, μια σχέση ανάμεσα στο x΄ και στο t΄. Εάν φέρουμε την τιμή c.t του x στην πρώτη και την τέταρτη εξίσωση μετασχηματισμού του Λόρεντς, έχουμε:

$$x' = \frac{(c-v)\cdot t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad t' = \frac{\left(1-\frac{v}{c}\right)\cdot t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

απ' όπου συνάγουμε αμέσως διαιρώντας[12]

$$x' = c \cdot t'$$

Η εξίσωση αυτή ορίζει την ταχύτητα του φωτός στο σύστημα Κ΄. Εξ αυτού συνάγεται ότι η ταχύτητα της διάδοσης ως προς το Κ΄ ισούται με c. Το ίδιο ισχύει και για τις φωτεινές ακτίνες που διαδίδονται προς έναν τυχαίο άξονα. Θα έπρεπε να το αναμένουμε καθώς οι εξισώσεις μετασχηματισμού του Λόρεντς υποχρεώθηκαν να πληρούν αυτή τη συνθήκη.

12ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Μεταβολές των μέτρων μήκους και των ρολογιών ανάλογα με την κίνησή τους

Ας τοποθετήσουμε έναν κανόνα μήκους ενός μέτρου στον άξονα των x΄ του συστήματος Κ κάνοντας τη μία άκρη του να συμπέσει με το σημείο x΄ = 0 και το άλλο του άκρο να βρίσκεται στο σημείο x΄ = 1. Ποιο είναι το

12. Σημειώσατε διαιρώντας το x΄ με t΄.

μήκος αυτού του μέτρου ως προς το σύστημα K΄; Αρκεί να ορίσουμε τη θέση των δύο του άκρων σε μια δεδομένη στιγμή t ως προς το σύστημα K. Η πρώτη εξίσωση μετασχηματισμού του Λόρεντς δίνει, σε χρόνο t = 0:

x (αρχή του μέτρου) = $0x\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ x (τέλος του μέτρου) = $1\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$

η απόσταση επομένως ισούται με $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$. Αλλά ο κανόνας του ενός μέτρου κινείται ως προς το K με ταχύτητα v. Συνάγεται ότι το μήκος του άκαμπτου κανόνα που κινείται με ταχύτητα v κατά τη φορά του μήκους του είναι $1\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ μέτρα. Ο κανόνας σε κίνηση είναι συνεπώς κοντύτερος από ό,τι ο ίδιος κανόνας ακίνητος και ακόμα πιο κοντός όσο μεγαλώνει η ταχύτητα. Η τετραγωνική ρίζα $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ θα ήταν άρα μηδενική για μια ταχύτητα v ίση με c και φανταστική για τις ανώτερες ταχύτητες. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι στη θεωρία της σχετικότητας η ταχύτητα c παίζει τον ρόλο μιας οριακής ταχύτητας που δεν μπορεί ούτε να τη φτάσει ούτε να την ξεπεράσει κάποιο πραγματικό σώμα.

Ο ρόλος αυτός της ταχύτητας c ως οριακής ταχύτητας προκύπτει ήδη από τις ίδιες τις εξισώσεις μετασχηματισμού του Λόρεντς. Οι τελευταίες δεν θα είχαν πλέον νόημα εάν το v ήταν μεγαλύτερο από το c.

Εάν είχαμε θεωρήσει αντίστροφα έναν κανόνα 1 μέτρου πάνω στον άξονα των x και ακίνητο ως προς το K, το μήκος του ως προς το K΄ θα βρισκόταν ίσο με $1\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ · όλα αυτά τα αποτελέσματα γίνονται κατ' ουσία αντιληπτά μέσω της αρχής της σχετικότητας, που ήταν και η αφετηρία μας.

Είναι *εκ προοιμίου* σαφές ότι έπρεπε να αντλήσουμε από τις εξισώσεις μετασχηματισμού ορισμένες πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές μεταβολές των κανόνων μέτρησης και των εκκρεμών. Οι ποσότητες x, y, z, t δεν είναι στην ουσία τίποτε άλλο παρά τα αποτελέσματα μετρήσεων που πάρθηκαν με κανόνες και ρολόγια. Εάν είχαμε χρησιμοποιήσει τον μετασχηματισμό του Γαλιλαίου, δεν θα είχαμε ανακαλύψει τη μείωση του μήκους του κανόνα ως αποτέλεσμα της κίνησης.

Ας θεωρήσουμε τώρα έναν δευτερολεπτοδείκτη, ακίνητο ως προς το K΄ στο σημείο x΄ = 0. Οι δύο χρόνοι t΄ = 0 και t΄ = 1 αναπαριστούν δύο διαδοχικούς χτύπους αυτού του ρολογιού. Η πρώτη και η τέταρτη εξίσωση μετασχηματισμού του Λόρεντς δίνουν, για αυτούς τους δύο χτύπους:

$$t = 0 \text{ και } t = \frac{1}{\sqrt{1 \frac{v^2}{c^2}}}$$

Το ρολόι κινείται με ταχύτητα v ως προς το Κ· ως προς αυτό το σύστημα αναφοράς, το χρονικό διάστημα που χωρίζει τους δύο διαδοχικούς χτύπους δεν είναι ένα δευτερόλεπτο αλλά $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ του δευτερολέπτου, δηλαδή εξαιτίας της κίνησης του ρολογιού, ένα χρονικό διάστημα μεγαλύτερο. Το κινούμενο ρολόι λειτουργεί πιο αργά απ' ό,τι σε ακινησία. Η ταχύτητα c παίζει κι εδώ τον ρόλο μιας οριακής ταχύτητας.

13ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Το θεώρημα της σύνθεσης των ταχυτήτων. Πείραμα του Φιζό[13]

Καθώς στην πράξη δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε παρά μόνον βαθμολογημένους κανόνες και ρολόγια, που έχουν ταχύτητα σημαντικά μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός, είναι πρακτικά αδύνατον να επαληθεύσουμε πειραματικά τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου. Επιπροσθέτως, θα φαίνονταν μάλλον εξωπραγματικά στον αναγνώστη. Ας περάσουμε λοιπόν σε ένα άλλο άμεσο συμπέρασμα που απορρέει από αυτή τη θεωρία και το οποίο επιβεβαιώνεται λαμπρά από την εμπειρία.

Ήδη διατυπώσαμε, στο 6ο κεφάλαιο, το θεώρημα της σύνθεσης των ταχυτήτων για τις ταχύτητες ίδιας διεύθυνσης, όπως το υπαγορεύουν οι υποθέσεις της κλασικής μηχανικής. Μπορούμε επίσης να το συνάγουμε εύκολα από τον μετασχηματισμό του Γαλιλαίου (11ο κεφάλαιο). Ας θεωρήσουμε, αντί για τον κινούμενο επιβάτη μέσα στο βαγόνι, ένα κινητό σημείο ως προς το σύστημα συντεταγμένων Κ΄ σύμφωνα με τον νόμο:

$$x' = wt'$$

---

13. Αρμάνδος-Ιππόλυτος-Λουδοβίκος Φιζό (1819-1896), Γάλλος φυσικός. Είναι γνωστός γιατί προέβλεψε, στα 1848, την απόκλιση των φασματικών γραμμών μιας φωτεινής πηγής κινούμενης ως προς έναν παρατηρητή. Μια διατριβή με το ίδιο θέμα, άγνωστη στο Φιζό, είχε δημοσιεύσει το 1842 ο Αυστριακός Ντόπλερ (1803-1853). Μέτρησε, στα 1849, με τη μέθοδο του οδοντωτού τροχού σε ταχεία περιστροφή, την ταχύτητα του φωτός· από το πείραμά του, που πραγματοποιήθηκε μεταξύ Συρεσνές και Μονμάρτης, κατέληξε σε μια ταχύτητα του φωτός μάλλον υπερβολικά μεγάλη (315.000 χλμ. Το δευτερόλεπτο).

Μπορούμε να εκφράσουμε τα x΄ και t΄ ανάλογα με τα x και t σύμφωνα με την πρώτη και την τέταρτη εξίσωση μετασχηματισμού του Γαλιλαίου. Θα έχουμε λοιπόν:

$$x' = (y + w)\, t$$

Η εξίσωση αυτή δίνει τον νόμο της κίνησης του σημείου σε σχέση με το σύστημα K΄ (του επιβάτη σε σχέση με τις ράγες). Ορίζουμε την ταχύτητα αυτού του σημείου μέσα σε αυτή την κίνηση ως W και παίρνουμε, όπως στο 6ο κεφάλαιο:

$$\text{(A)} \qquad W = v + w$$

Μπορούμε να προβούμε σε έναν εντελώς ανάλογο συλλογισμό στηριζόμενοι στη θεωρία της σχετικότητας. Αρκεί να αντικαταστήσουμε στην εξίσωση:

$$x' = wt'$$

τα x΄ και t΄ με τις τιμές τους παρμένες από την πρώτη και την τέταρτη εξίσωση μετασχηματισμού του Λόρεντς. Έχουμε έτσι αντί για την εξίσωση (A) την εξίσωση:

$$\text{(B)} \qquad W = \frac{v+w}{1 + \frac{v \cdot w}{c^2}}$$

που μεταφράζει στη θεωρία της σχετικότητας το θεώρημα της σύνθεσης των ταχυτήτων για ταχύτητες ίδιας διεύθυνσης. Τώρα το ζητούμενο είναι να μάθουμε ποιο από τα δύο θεωρήματα αντιστοιχεί στην πραγματικότητα. Ένα εξαιρετικά σημαντικό πείραμα το οποίο οφείλουμε, εδώ και περισσότερο από μισόν αιώνα, στον μεγαλοφυή φυσικό Φιζό, και το οποίο επανέλαβαν έκτοτε ορισμένοι από τους κορυφαίους πειραματιστές, μας πληροφορεί σχετικά χωρίς να αφήνει κανένα περιθώριο αμφιβολίας. Το εν λόγω πείραμα συνδέεται με το ακόλουθο ερώτημα: Έστω ότι το φως διαδίδεται σε κάποιο ακίνητο υγρό με ταχύτητα w. Με ποια ταχύτητα διαδίδεται, κατά τον άξονα του βέλους, σε έναν αγωγό R που τον διατρέχει το ίδιο υγρό με ταχύτητα v;

Χρειάζεται να υποθέσουμε, σύμφωνα με την αρχή της σχετικότητας, ότι το φως διαδίδεται πάντοτε με την ίδια ταχύτητα w ως προς το υγρό, είτε το υγρό αυτό κινείται είτε αδρανεί σε σχέση με άλλα σώματα. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του φωτός σε σχέση με το υγρό και την ταχύτητα του υγρού ως προς τον αγωγό, ψάχνουμε την ταχύτητα του φωτός ως προς τον αγωγό.

Είναι σαφές ότι το πρόβλημα παραμένει το ίδιο όπως και στο 6ο κεφάλαιο. Ο αγωγός παίζει τον ρόλο των σιδηροδρομικών γραμμών, δηλαδή του συστήματος συντεταγμένων K, το υγρό έχει τον ρόλο του βαγονιού, δηλαδή του συστήματος συντεταγμένων K΄, και τέλος το φως παίζει τον ρόλο του κινούμενου επιβάτη, δηλαδή του κινητού σημείου που θεωρήσαμε προηγουμένως. Εάν ορίσουμε την ταχύτητα του φωτός ως προς τον σωλήνα W, αυτή μας δίνεται είτε από την εξίσωση (A) είτε από τη (B), καθώς είτε ο ένας είτε ο άλλος από τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου ή του Λόρεντς ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Το πείραμα αποφαίνεται υπέρ της εξίσωσης (B) όπως συνάγεται από τη θεωρία της σχετικότητας και μάλιστα με πολύ ακριβή τρόπο. Την επίδραση της ταχύτητας του υγρού v στη διάδοση του φωτός παριστάνει ο τύπος (B) σύμφωνα με τα ιδιαίτερα αξιοσημείωτα πειράματα του Ζέεμαν[14] κατά προσέγγιση μεγαλύτερη από 1 προς 100.

Οφείλουμε βεβαίως να σημειώσουμε ότι, πολύ πριν από την εμφάνιση της θεωρίας της σχετικότητας, ο Χ.Α. Λόρεντς είχε εξηγήσει θεωρητικά αυτό το φαινόμενο με μια αμιγώς ηλεκτροδυναμική διαδικασία με τη βοήθεια ορισμένων υποθέσεων πάνω στην ηλεκτρομαγνητική δομή της ύλης. Τούτο όμως δεν αλλάζει σε τίποτε την αποδεικτική ισχύ αυτού του πειράματος ως κρίσιμου πειράματος υπέρ της θεωρίας της σχετικότητας. Η ηλεκτροδυναμική του Μάξγουελ[15] και του Λόρεντς πάνω στην οποία βεβαίως βασιζόταν η πρώτη θεωρία δεν αντιβαίνει τη θεωρία της σχετικότητας. Αντιθέτως, η τελευταία ξεπήδησε από την ηλεκτροδυναμική ως μια εξαιρετικά απλή σύνοψη και μια γενίκευση ανεξάρτητων τότε υποθέσεων, στις οποίες στηριζόταν η ηλεκτροδυναμική.

14ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Η αξία της θεωρίας της σχετικότητας στις μέρες μας

Οι σκέψεις που εκτέθηκαν μέχρι στιγμής μπορούν να συνοψιστούν ως εξής. Η εμπειρία οδήγησε στην πεποίθηση ότι αφενός η θεωρία της (ειδικής) σχετικότητας αλήθευε κι ότι αφετέρου η ταχύτητα της διάδοσης του φωτός στο κενό ήταν ίση με μια σταθερά c. Ο νόμος μετασχηματισμού των ορθογώνιων συντεταγμένων x, y, z και της εποχής t που χαρακτηρίζουν ένα γεγονός προέκυψε από τον συνδυασμό των δύο αυτών αξιωμάτων, και τελικά δεν επιβίωσε ο μετασχηματισμός του Γαλιλαίου αλλά (αντίθετα από την κλασική μηχανική) εκείνος του Λόρεντς.

---

14. Πίτερ Ζέεμαν (1865-1943), Ολλανδός φυσικός που, το 1897, παρατήρησε τον διαχωρισμό των φασματικών γραμμών υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου, φαινόμενο που είχε προβλέψει ο Λόρεντς.

15. Τζέιμς Κλερκ Μάξγουελ (1831-1879) Σκωτσέζος φυσικός. Είχε αφιερώσει ένα μεγάλο μέρος της δραστηριότητάς του στη θεωρία του ηλεκτρισμού, του μαγνητισμού και του φωτός. Η ηλεκτρομαγνητική του θεωρία περί φωτός δημοσιεύτηκε σε μια εργασία το 1864 και η *Πραγματεία περί ηλεκτρισμού και μαγνητισμού* το 1873.

Στην εκτιθέμενη θεωρία, ο νόμος της διάδοσης του φωτός έπαιζε έναν σημαντικό ρόλο, που δικαιολογείται από όσα πραγματικά γνωρίζουμε. Από τη στιγμή όμως που κατέχουμε τον μετασχηματισμό του Λόρεντς, μπορούμε να τον συνδέσουμε με την αρχή της σχετικότητας και να συνοψίσουμε ως εξής την εν λόγω θεωρία:

Κάθε φυσικός νόμος πρέπει να είναι τέτοιος που να μετασχηματίζεται σε έναν νόμο της ίδιας μορφής όταν εισαγάγουμε αντί για τις μεταβλητές τόπου και χρόνου x, y, z, t τις σχετικές με το σύστημα συντεταγμένων K, νέες μεταβλητές x΄, y΄, z΄, t΄ σχετικές με το σύστημα συντεταγμένων K΄. Αυτό σημαίνει, από μαθηματικής άποψης, ότι η σχέση ανάμεσα στις τονούμενες και τις μη τονούμενες ποσότητες δίδεται από τον μετασχηματισμό του Λόρεντς. Πιο συνοπτικά: **οι γενικοί φυσικοί νόμοι παραμένουν απαράλλαχτοι από τους μετασχηματισμούς του Λόρεντς**.

Πρόκειται για μια συγκεκριμένη μαθηματική συνθήκη την οποία επιβάλλει η αρχή της σχετικότητας σε κάθε φυσικό νόμο· έτσι, αποτελεί σήμερα ένα σημαντικό βοήθημα για την ανακάλυψη αυτών των γενικών νόμων. Εάν βρισκόταν μία από αυτές που δεν πληροί αυτή την συνθήκη, θα έπρεπε να απορρίψουμε τουλάχιστον τη μία από αυτές τις δύο υποθέσεις στις οποίες βασίζεται αυτή η θεωρία. Ας εξετάσουμε τώρα σε ποια γενικά συμπεράσματα έχει καταλήξει έως σήμερα.

15ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Γενικές συνέπειες αυτής της θεωρίας

Συνάγεται καταφανώς από τις προηγούμενες παρατηρήσεις ότι η θεωρία της ειδικής σχετικότητας προέκυψε από την ηλεκτροδυναμική και την οπτική. Η υπόθεση της σχετικότητας ελάχιστα τροποποίησε στους τομείς αυτούς όσα υποστηρίζει η θεωρία, ενώ απλοποίησε σημαντικά το θεωρητικό της οικοδόμημα, δηλαδή την εδραίωση νόμων κι ακόμη (πράγμα που είναι πολύ σημαντικότερο) μείωσε αισθητά τον αριθμό των ανεξάρτητων υποθέσεων στις οποίες εδράζεται το οικοδόμημα αυτό. Κατέστησε τόσο προφανή τη θεωρία του Μάξγουελ και του Λόρεντς ώστε να επικρατήσει στον χώρο των φυσικών, ακόμη κι αν η εμπειρία την ενίσχυε λιγότερο πειστικά.

Η κλασική μηχανική χρειαζόταν μια τροποποίηση προτού συμφωνήσει με τη θεωρία της σχετικότητας. Εντούτοις, η τροποποίηση αυτή συμβαίνει μονάχα στους νόμους των ταχέων κινήσεων, όπου οι ταχύτητες v της ύλης είναι συγκρίσιμες με την ταχύτητα του φωτός. Μονάχα τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα κινούνται με τόσο ταχείες κινήσεις· για τις υπόλοιπες κινήσεις οι αποκλίσεις της κλασικής μηχανικής είναι εξαιρετικά μικρές ώστε να μπορέσουμε να τις παρατηρήσουμε στην πράξη. Δεν θα αναφερθούμε στην κίνηση των αστέρων παρά μόνον αναφορικά με τη θεωρία της γενικής σχετικότητας. Σύμφωνα με την αρχή της σχετικότητας, η κινητική ενέργεια ενός υλικού σημείου μάζας m δεν δίνεται πλέον με τον γνωστό τύπο:

$$m\cdot \frac{v^2}{2}$$

αλλά με τον τύπο:

$$\frac{m\cdot c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Ο τύπος αυτός τείνει προς το άπειρο όταν η ταχύτητα v τείνει προς την ταχύτητα του φωτός c. Η ταχύτητα πρέπει άρα να παραμένει πάντοτε μικρότερη από c, όσο μεγάλες κι αν είναι οι ενέργειες που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε επιχειρώντας να την επιταχύνουμε. Αναπτύσσοντας σε σειρά, παίρνουμε τον τύπο της κινητικής θεωρίας:

$$m\cdot c^2 + m\cdot \frac{v^2}{2} + \frac{3}{8}\cdot m\cdot \frac{v^4}{c^2} + \ldots$$

Όταν v^2/c^2 είναι μικρότερο του 1, ο τρίτος από αυτούς τους όρους είναι πάντοτε μικρότερος από τον δεύτερο, τον μόνο που λαμβάνει υπόψη της η κλασική μηχανική. Ο πρώτος όρος δεν περιλαμβάνει την ταχύτητα κι άρα δεν υπάρχει λόγος να ληφθεί υπόψη όταν έχουμε απλώς να ορίσουμε πώς η ενέργεια ενός υλικού σημείου εξαρτάται από την ταχύτητα. Θα μιλήσουμε παρακάτω για τη θεωρητική του σημασία.

Το σημαντικότερο γενικού χαρακτήρα αποτέλεσμα στο οποίο οδήγησε η ειδική θεωρία της σχετικότητας αφορά την έννοια της μάζας. Πριν από τη θεωρία της σχετικότητας, η φυσική στηριζόταν σε δύο θεμελιώδεις αρχές: στην αρχή της διατήρησης της ενέργειας και στην αρχή της διατήρησης της μάζας· οι δύο αυτές θεμελιώδεις αρχές εμφανίζονται ως εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η θεωρία της σχετικότητας τις συνέπτυξε σε μία. Θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τον τρόπο με τον οποίο συντελέστηκε αυτή η σύμπτυξη.

Η αρχή της σχετικότητας προϋποθέτει την ισχύ του νόμου της διατήρησης της ενέργειας, όχι μόνο ως προς ένα σύστημα συντεταγμένων K, αλλά και ως προς ένα σύστημα συντεταγμένων K΄ που κινείται ομοιόμορφα με κίνηση μεταφοράς σε σχέση με το K (με μια λέξη, σε σχέση με οποιοδήποτε σύστημα συντεταγμένων του Γαλιλαίου). Για το πέρασμα από το ένα σύστημα συντεταγμένων σε κάποιο άλλο, ο μετασχηματισμός του Λόρεντς είναι επιβεβλημένος, αντίθετα με την κλασική μηχανική.

Μπορούμε να συνάγουμε από αυτές τις προτάσεις και τις θεμελιώδεις εξισώσεις της ηλεκτροδυναμικής του Μάξγουελ, με απόλυτη βεβαιότητα και μέσω τόσο απλών παρατηρήσεων, το ακόλουθο συμπέρασμα: Ένα κινητό σώμα που κινείται με μια πολύ μεγάλη ταχύτητα v και το οποίο δέχεται την ενέργεια E_0 με τη μορφή ακτινοβολίας, χωρίς να αλλάζει η ταχύτητα, σημειώνει μια αύξηση της ενέργειας ίση με:

$$\frac{E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Η ζητούμενη ενέργεια του σώματος δίδεται επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο της κινητικής ενέργειας που δόθηκε προηγουμένως, ως:

$$\frac{\left(m+\frac{E_0}{c^2}\right)c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Το σώμα έχει άρα την ίδια ενέργεια με ένα κινητό σώμα που κινείται με ταχύτητα v και μάζα ίση με $m + E_0/c^2$. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι, εάν ένα σώμα δέχεται μια ενέργεια E_0, η αδρανειακή μάζα του βρίσκεται αυξημένη κατά την ποσότητα E_0/c^2· η αδρανειακή μάζα ενός σώματος δεν είναι επομένως σταθερή, αλλά σαφώς μεταβλητή καθώς μεταβάλλεται και η ενέργειά του. Η αδρανειακή μάζα ενός συστήματος σωμάτων μπορεί άρα να θεωρηθεί χωρίς περιστροφές η μέτρηση της ενέργειάς του. Η αρχή της διατήρησης της μάζας ενός συστήματος καταρρέει μαζί με την αρχή της διατήρησης της ενέργειας και ισχύει μονάχα όσο το σύστημα δεν υφίσταται καμία μεταβολή ενέργειας. Εάν σημειώσουμε τον τύπο της ενέργειας ως:

$$\frac{m\cdot c^2+E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

βλέπουμε ότι ο όρος mc^2 τον οποίο ήδη σημειώσαμε προηγουμένως δεν είναι άλλος από την ενέργεια που είχε το σώμα προτού δεχθεί την ενέργεια E_0.

Η εμπειρική επαλήθευση αυτής της αρχής είναι προς στιγμήν αδύνατη, καθώς οι μεταβολές ενέργειας E_0 που μπορούμε να δώσουμε σε ένα σύστημα δεν είναι αρκετά μεγάλες ώστε να μπορούν να αλλάζουν σημαντικά τη αδρανειακή μάζα του συστήματος. Η ποσότητα E_0/c^2 είναι υπερβολικά μικρή σε σχέση με τη μάζα m που είχε το σώμα προτού υποστεί μια μεταβολή ενέργειας. Γι' αυτό και στάθηκε δυνατόν να διατυπώσουμε επιτυχώς μια αρχή διατήρησης της μάζας, που να έχει καθαυτή μια ορισμένη αξία.

Και μια τελευταία βασική παρατήρηση. Η επιτυχία της εξήγησης των Φαραντέι-Μάξγουελ της ηλεκτρομαγνητικής δράσης από απόσταση μέσω μιας βαθμιαίας δράσης με μια πεπερασμένη ταχύτητα διάδοσης είχε ως αποτέλεσμα να διαδοθεί μεταξύ των φυσικών η πεποίθηση ότι δεν μπορούσαν να υπάρχουν στιγμιαίες και άμεσες δράσεις σαν τη νευτώνεια βαρύτητα. Με τη θεωρία της σχετικότητας αντικαταστάθηκε η εξ αποστάσεως στιγμιαία δράση, δηλαδή η εξ αποστάσεως δράση με μια άπειρη ταχύτητα διάδοσης, από μια εξ αποστάσεως δράση με την ταχύτητα του φωτός. Αυτό απορρέει από τον βασικό ρόλο που διαδραματίζει σε αυτή τη θεωρία η ταχύτητα c. Στο δεύτερο μέρος θα δούμε πώς στη γενική θεωρία της σχετικότητας αυτό το αποτέλεσμα πρέπει να τροποποιηθεί.

16ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Η ειδική θεωρία της σχετικότητας και η εμπειρία

Έχουμε ήδη καταδείξει, αναφορικά με το θεμελιώδες πείραμα του Φιζό, πόσο δύσκολο είναι να μάθουμε μέχρι ποιο σημείο η θεωρία της ειδικής σχετικότητας στηρίζεται στην εμπειρία. Η θεωρία του Μάξγουελ και του Λόρεντς σχετικά με τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα αποκρυσταλλώθηκε, τρόπον τινά, στην ειδική θεωρία της σχετικότητας. Γι' αυτό και όλα τα πειραματικά αποτελέσματα, που στηρίζουν την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, στηρίζουν επίσης τη θεωρία της σχετικότητας. Σημειώνω εδώ το ιδιαίτερα σημαντικό γεγονός ότι η θεωρία της σχετικότητας εξηγεί πλήρως και πολύ απλά τις επιδράσεις –που καταδείχθηκαν πειραματικά– της κίνησης της γης ως προς τους απλανείς αστέρες στο φως που μας εκπέμπουν· δηλαδή την ετήσια μετατόπιση της φαινομενικής θέσης των απλανών αστέρων λόγω της κίνησης της Γης σε σχέση με τον Ήλιο (αποπλάνηση), και την επίδραση της ακτινοειδούς συνιστώσας των σχετικών κινήσεων των απλανών αστέρων σε σχέση με τη Γη στο χρώμα του φωτός που φτάνει έως εμάς. Η τελευταία αυτή επίδραση εκδηλώνεται με μια μικρή μετατόπιση των φασματικών γραμμών, που δίνεται από το φως που έρχεται από αυτούς τους απλανείς αστέρες, σε σχέση με το φάσμα που δίνεται από μια γήινη πηγή (αρχή του Ντόπλερ). Τα πειραματικά επιχειρήματα υπέρ της θεωρίας των Μάξγουελ και Λόρεντς που συνιστούν ταυτόχρονα και επιχειρήματα υπέρ της θεωρίας της σχετικότητας είναι εξαιρετικά πολυάριθμα για να παρατεθούν εδώ. Περιστέλλουν πάντως σε τέτοιο βαθμό τις θεωρητικές πιθανότητες που καμία άλλη θεωρία από αυτή των Μάξγουελ και Λόρεντς δεν καταφέρνει να αντισταθεί στη δοκιμασία του πειράματος.

Υπάρχουν ωστόσο δύο διαφορετικές τάξεις πειραματικών γεγονότων που έχουν ανακαλυφθεί έως σήμερα, κι η θεωρία των Μάξγουελ και Λόρεντς δεν μπορεί να εξηγήσει παρά μόνον με τη συνδρομή μιας βοηθητικής υπόθεσης που φαντάζει αφ' εαυτή παράδοξη, δηλαδή χωρίς τη χρήση της θεωρίας της σχετικότητας. Είναι γνωστό ότι οι καθοδικές ακτίνες και οι ακτίνες β που εκπέμπονται από ραδιενεργές ουσίες συντίθεται από αρνητικά φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια) ελάχιστης αδράνειας και τεράστιας ταχύτητας. Μπορούμε να προσδιορίσουμε με μεγάλη ακρίβεια τον νόμο της κίνησης αυτών των σωματιδίων, μελετώντας την παρεκτροπή αυτών των ακτινών λόγω ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων.

Στη θεωρητική μελέτη των ηλεκτρονίων προσκρούουμε στη δυσκολία ότι μόνη της η ηλεκτροδυναμική δεν μπορεί να αποφανθεί για τη φύση τους. Και όντως, αφού οι ομώνυμες ηλεκτρικές μάζες απωθούνται, οι αρνητικές ηλεκτρικές μάζες που απαρτίζουν ένα ηλεκτρόνιο θα έπρεπε να αποχωρίζονται υπό την επίδραση της αμοιβαίας δράσης τους εάν δεν υπήρχαν άλλες δυνάμεις των οποίων η φύση μάς είναι ακόμη άγνωστη. Εάν παραδεχτούμε ότι σχετικές δυνάμεις των ηλεκτρικών μαζών που απαρτίζουν ένα ηλεκτρόνιο παραμένουν αμετάβλητες παρά την κίνηση του τελευταίου (σταθερή σχέση σύμφωνα με την κλασική μηχανική), βρίσκουμε έναν νόμο της κίνησης του ηλεκτρονίου που δεν επαληθεύεται από την εμπειρία. Ο Χ. Α. Λόρεντς, καθοδηγημένος από καθαρά θεωρητικά συμπεράσματα, πρώτος διατύπωσε την υπόθεση ότι εξαιτίας της κίνησης το σώμα του ηλεκτρονίου υφίσταται μια συστολή προς τον άξονα της κίνησης ανάλογη προς τον τύπο:

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

Η υπόθεση αυτή, που δεν αποδεικνύεται σε τίποτα από την ηλεκτροδυναμική, δίνει τον νόμο της κίνησης που επαληθεύτηκε με μεγάλη ακρίβεια τα τελευταία χρόνια.

Η θεωρία της σχετικότητας κατέληξε στον ίδιο νόμο της κίνησης χωρίς να χρειαστεί την παραμικρή ειδική υπόθεση αναφορικά με τη δομή και τον τρόπο συμπεριφοράς του ηλεκτρονίου. Τα πράγματα έχουν όπως και στο πείραμα του Φιζό στο οποίο αναφερθήκαμε στο 13ο κεφάλαιο και το οποίο εξήγησε η θεωρία της σχετικότητας χωρίς να καταφύγει σε καμία υπόθεση σχετικά με τη φυσική υπόσταση του υγρού.

Η δεύτερη κατηγορία γεγονότων, την οποία υπαινισσόμαστε εδώ, συνδέεται με τη διερεύνηση της πιθανότητας τα πειράματα να μπορούν να μας πληροφορούν σχετικά με την απόλυτη κίνηση της γης μέσα στο σύμπαν. Αναφέραμε ήδη στο 5ο κεφάλαιο ότι όλες οι προσπάθειες προς αυτή την κατεύθυνση δεν έδωσαν παρά αρνητικά αποτελέσματα. Πριν την εμφάνιση της θεωρίας της σχετικότητας, η επιστήμη δυσκολευόταν πολύ να εξηγήσει αυτή την αρνητική διαπίστωση·τα πράγματα είχαν ως εξής: Οι κρατούσες προκαταλήψεις περί χρόνου και χώρου δεν άφηναν τα περιθώρια αμφιβολίας σχετικά με την ανάγκη χρήσης των μετασχηματισμών του Γαλιλαίου για τη μετάβαση* από ένα σύστημα αναφοράς σε ένα άλλο. Εάν δεχτούμε την εγκυρότητα των εξισώσεων των Μάξγουελ και Λόρεντς για ένα σύστημα σύγκρισης Κ, βρίσκουμε ότι παύουν να ισχύουν για ένα σύστημα αναφοράς Κ΄ που κινείται ομαλά ως προς το Κ όταν υιοθετούμε τον μετασχηματισμό του Γαλιλαίου για τη μετάβαση από τις συντεταγμένες ως προς το Κ στις συντεταγμένες ως προς το Κ΄. Φαίνεται λοιπόν ότι από όλα τα συστήματα συντεταγμένων του Γαλιλαίου ένα σύστημα Κ, που κινείται με μια ιδιαίτερη κίνηση, διακρίνεται φυσικά από όλα τα υπόλοιπα. Τούτο εξηγούνταν από φυσικής απόψεως κοιτώντας το Κ ως ακίνητο σε σχέση με έναν υποθετικό αιθέρα, έδρα της διάδοσης του φωτός. Αντιθέτως, όλα τα συστήματα συντεταγμένων Κ΄ σε κίνηση ως προς το Κ έπρεπε να είναι σε κίνηση σε σχέση με τον αιθέρα. Αποδίδαμε σε αυτή την κίνηση του Κ΄ σε σχέση με τον αιθέρα (άνεμος του αιθέρα σχετικός με το Κ΄) τους περίπλοκους νόμους που αντιπροσώπευαν την κίνηση σε σχέση με ένα Κ΄. Χρειάστηκε άρα να δεχτούμε μια τέτοια κίνηση ως προς τη Γη κι οι φυσικοί πάσχισαν επί μακρόν να την παρουσιάσουν.

Για να επιτύχει κάτι τέτοιο, ο Μάικελσον[16] είχε φανταστεί μια οδό που έδειχνε να οδηγεί οπωσδήποτε εκεί. Ας φανταστούμε δύο καθρέφτες τοποθετημένους πάνω σε ένα στερεό σώμα, με στραμμένες τις ανακλαστικές πλευρές τους τη μία απέναντι στην άλλη. Μία φωτεινή ακτίνα χρειάζεται έναν συγκεκριμένο χρόνο Τ για να διανύσει μετ' επιστροφής την απόσταση που χωρίζει τα δύο κάτοπτρα, στην περίπτωση που το εν λόγω σύστημα είναι ακίνητο σε σχέση με τον αιθέρα. Βρίσκουμε όμως, με υπολογισμό, ένα κάπως διαφορετικό χρονικό διάστημα Τ΄ όταν το σώμα και οι καθρέπτες κινούνται σε σχέση με τον αιθέρα. Επιπροσθέτως, ο υπολογισμός δείχνει ότι αυτό το χρονικό διάστημα Τ΄ διαφέρει ανάλογα με το εάν το σώμα μετατοπίζεται κάθετα ή παράλληλα με τις επιφάνειες των κατόπτρων, για μια δεδομένη ταχύτητα v σε σχέση με τον αιθέρα. Ο Μάικελσον και ο Μόρλεϊ[17] παρουσίασαν ένα πείραμα συμβολής που προοριζόταν να δείξει σαφώς την απόκλιση που είχε υπολογιστεί κατ' αυτόν τον τρόπο, όσο μικρή κι αν ήταν. Το πείραμα όμως αυτό δεν έδωσε παρά ένα αρνητικό αποτέλεσμα προκαλώντας τεράστια σύγχυση στους φυσικούς. Ο Λόρεντς και ο Φιτζέραλντ συνήγαγαν ότι η κίνηση του σώματος σε σχέση με τον αιθέρα προκαλεί μια συστολή του τελευταίου προς τον άξονα της κίνησης που ευθύνεται συγκεκριμένα για την εξάλειψη αυτής της χρονικής απόκλισης. Μια σύγκρι-

---

16. Άλμπερτ Άμπρααμ Μάικελσον (1852-1931). Είναι ο πρώτος Αμερικανός που κέρδισε βραβείο Νόμπελ φυσικής το 1907 («για την ακρίβεια των οπτικών του οργάνων και την ποιότητα των πειραμάτων που πραγματοποίησε με αυτά»). Τον Ιούλιο του 1887 επιχείρησε να αποδείξει την κίνηση της γης ως προς τον αιθέρα.

17. Έντουαρντ Ουίλιαμς Μόρλεϊ (1838-1923). Αμερικάνος φυσικός και χημικός που αφιέρωσε τις τελευταίες του επιστημονικές δραστηριότητες στην φασματοσκοπία και την αλληλοδιαθλασομετρία.

* (ΣτΜ) Εδώ η λέξη μετάβαση σημαίνει τη «μετάφραση» των αποτελεσμάτων από το ένα σύστημα αναφοράς στο άλλο.

ση με τους συλλογισμούς του 12ου κεφαλαίου δείχνει ότι αυτή η συλλογιστική έστεκε και από πλευράς της θεωρίας της σχετικότητας. Σύμφωνα με την τελευταία, δεν υπάρχει προνομιακό σύστημα συντεταγμένων που να δίνει την ευκαιρία να εισάγουμε την ιδέα του αιθέρα κι άρα ούτε του ανέμου του αιθέρα, όπως δεν υπάρχει και πείραμα που να το αποδεικνύει. Η συστολή του κινούμενου σώματος απορρέει ακόμη, χωρίς κάποια ειδική υπόθεση, από τις δύο βασικές αρχές αυτής της θεωρίας· πιθανότατα μάλιστα τη συστολή αυτή δεν την καθορίζει η κίνηση καθ' εαυτή (που δεν έχει καμία σημασία για εμάς) αλλά η κίνηση σε σχέση με το προεπιλεγμένο σύστημα αναφοράς. Γι' αυτό το σύνολο των δύο κατόπτρων που εξετάστηκε στο πείραμα των Μάικελσον και Μόρλεϊ δεν μικραίνει για ένα σύστημα αναφοράς που συμπαρασύρεται από τη Γη αλλά για ένα σύστημα αναφοράς ακίνητο σε σχέση με τον Ήλιο.

17ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Ο τετραδιάστατος χώρος του Μινκόφσκι[18]

Ένα μυστηριώδες ρίγος διαπνέει τον μη μαθηματικό όταν ακούει να γίνεται λόγος για τον τετραδιάστατο χώρο, αίσθηση αρκετά παρόμοια με εκείνη που προξενεί το φάντασμα στην όπερα. Κι εντούτοις δεν υπάρχει τίποτε πιο τετριμμένο από το να εξομοιώσουμε τον κόσμο μας σε ένα χωροχρονικό συνεχές τεσσάρων διαστάσεων.

Ο χώρος είναι ένα τρισδιάστατο συνεχές. Τούτο σημαίνει ότι είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε τη θέση ενός (ακίνητου) σημείου με τη βοήθεια τριών αριθμών (συντεταγμένων) x, y, z και ότι για κάθε σημείο υπάρχουν σημεία αρκετά γειτονικά των οποίων η θέση μπορεί να προσδιοριστεί με τις τιμές των συντεταγμένων x·, y·, z· όσο γειτονικών θέλουμε στις συντεταγμένες x, y, z του αρχικού σημείου που θεωρήσαμε. Η τελευταία αυτή ιδιότητα είναι χαρακτηριστική ενός συνεχούς και θα πούμε ότι έχει τρεις διαστάσεις εξαιτίας του αριθμού τρία των συντεταγμένων.

Κατά ανάλογο τρόπο, ο φυσικός κόσμος τον οποίο ο Μινκόφσκι ονομάζει απλώς κόσμο, είναι φυσικά ένας κόσμος σε τέσσερις διαστάσεις από την πλευρά του χρόνου και του χώρου. Αποτελείται για την ακρίβεια από

18. Χέρμαν Μινκόφσκι (1864-1909), Γερμανός μαθηματικός. Συνεχιστής των εργασιών του Γκάους, στάθηκε ο πρώτος που αντιλήφθηκε ότι η αρχή της σχετικότητας που διατυπώθηκε από τον Λόρεντς και τον Αϊνστάιν συνεπαγόταν την εγκατάλειψη της αρχής του διαχωρισμού χώρου και χρόνου και επέβαλλε τη σύλληψη ενός τετραδιάστατου χωροχρόνου.

έναν ορισμένο αριθμό μεμονωμένων γεγονότων, το καθένα από τα οποία προσδιορίζεται από τέσσερις αριθμούς, δηλαδή τρεις συντεταγμένες θέσης x, y, z και μία συντεταγμένη χρόνου ή εποχής t. Ο κόσμος είναι λοιπόν ένα συνεχές, καθώς για κάθε γεγονός υπάρχουν οσαδήποτε γειτονικά γεγονότα θέλουμε (πραγματικά ή φανταστικά), των οποίων οι συντεταγμένες x΄, y΄, z΄ διαφέρουν όσο λίγο θέλουμε από τις συντεταγμένες x, y, z, t από το αρχικό γεγονός που θεωρήσαμε. Δεν έχουμε συνηθίσει να κοιτάμε τον κόσμο ως τετραδιάστατο συνεχές γιατί, πριν τη θεωρία της σχετικότητας, ο χρόνος έπαιζε στη φυσική έναν ρόλο διαφορετικό και ανεξάρτητο από τις συντεταγμένες θέσης. Γι' αυτό και συνηθίζουμε να μεταχειριζόμαστε τον χρόνο ως ένα ανεξάρτητο συνεχές. Πράγματι, στην κλασική φυσική ο χρόνος αντιπροσωπεύει μια απόλυτη ποσότητα, ανεξάρτητη δηλαδή από τη θέση και την κινητική κατάσταση του συστήματος αναφοράς. Αυτό ακριβώς εκφράζει η τελευταία εξίσωση μετασχηματισμού του Γαλιλαίου ($t' = t$).

Σύμφωνα με τη διατύπωση της θεωρίας της σχετικότητας, είμαστε υποχρεωμένοι να θεωρήσουμε τον κόσμο ως ένα συνεχές σε τέσσερις διαστάσεις, μια και ο χρόνος δεν είναι πλέον ανεξάρτητος όπως δείχνει η τέταρτη εξίσωση μετασχηματισμού του Λόρεντς:

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Σύμφωνα με αυτή την εξίσωση, η διαφορά χρόνου $\Delta t'$ των δύο γεγονότων ως προς το K΄ γενικά δεν εκμηδενίζεται όταν μάλιστα εκμηδενίζεται η διαφορά χρόνου Δt των ίδιων ακριβώς γεγονότων ως προς το K΄. Δύο γεγονότα που διαφέρουν απλώς ως προς τη θέση σε σχέση με το K διαφέρουν επίσης και ως προς τον χρόνο σε σχέση με το K΄. Δεν είναι αυτή όμως η σπουδαιότατη ανακάλυψη του Μινκόφσκι για την τυπολογική εξέλιξη της θεωρίας της σχετικότητας· εκείνη έγκειται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι το τετραδιάστατο συνεχές χώρου και χρόνου της θεωρίας της σχετικότητας παρουσιάζει, στις ιδιότητές του, τη μέγιστη συγγένεια με το τρισδιάστατο συνεχές της ευκλείδειας γεωμετρίας. Ωστόσο, για να προβάλουμε καθ' ολοκληρία την προκείμενη συγγένεια, πρέπει να εισάγουμε στη θέση της συνήθους συντεταγμένης του χρόνου t την αναλογική και φανταστική ποσότητα $\sqrt{-1}\, c \cdot t$. Τότε όμως οι φυσικοί νόμοι που ανταποκρίνονται σε αυτή τη θεωρία της ειδικής σχετικότητας παίρνουν μαθηματικές μορφές όπου η συντεταγμένη του χρόνου παίζει ακριβώς τον ίδιο ρόλο όπως και οι τρεις συντεταγμένες της θέσης. Οι τέσσερις αυτές συντεταγμένες αντιστοιχούν, στις εξισώσεις, στις τρεις συντεταγμένες της ευκλείδειας γεωμετρίας. Πρέπει να καταστεί σαφές, ακόμη και στον μη μαθηματικό, ότι με αυτήν την αμιγώς μορφολογική σύγκλιση, η θεωρία κερδίζει εκπληκτικά σε σαφήνεια.

Οι ατελείς αυτές εξηγήσεις δεν μπορούν να δώσουν στον αναγνώστη παρά μια ιδιαίτερα ασαφή έννοια της σημαντικότατης ιδέας του Μινκόφσκι, χωρίς την οποία η θεωρία της γενικής σχετικότητας –την οποία σε γενικές γραμμές θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια– θα παρέμενε μάλλον ακόμη στα σπάργανα. Καθώς όμως μια βαθύτερη κατανόηση αυτού του γεγονότος –του ασφαλώς πολύ δυσνόητου για τον αμύητο στα μαθηματικά αναγνώστη– δεν είναι απαραίτητη για την κατανόηση των θεμελιωδών ιδεών της θεωρίας της ειδικής και γενικής σχετικότητας, δεν θα επεκταθώ στο εν λόγω ζήτημα, με την επιφύλαξη να επανέλθω στις τελευταίες μόνο σελίδες του παρόντος ευσύνοπτου βιβλίου.

ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ – Η ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

18ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Αρχή της ειδικής και γενικής θεωρίας της σχετικότητας

Η θεμελιώδης θέση στην οποία βασίζονταν όλοι οι συλλογισμοί που παρουσιάστηκαν μέχρις εδώ ήταν η αρχή της ειδικής σχετικότητας, δηλαδή η αρχή της φυσικής σχετικότητας κάθε ομαλής κίνησης.

Ανέκαθεν φαινόταν προφανές ότι οποιαδήποτε κίνηση δεν μπορούσε να εκληφθεί παρά ως σχετική κίνηση σύμφωνα με την καθαυτή της έννοια. Έτσι, ας ξαναδούμε το παράδειγμα των γραμμών και του βαγονιού της αμαξοστοιχίας που χρησιμοποιήσαμε πολλάκις. Μπορούμε να διατυπώσουμε το γεγονός αυτής της κίνησης με τον ένα ή τον άλλο τρόπο:

α. Το βαγόνι κινείται σε σχέση με τις γραμμές.

β. Οι γραμμές κινούνται σε σχέση με το βαγόνι.

Στην πρώτη περίπτωση ως σύστημα αναφοράς λειτουργούν οι γραμμές ενώ στη δεύτερη περίπτωση το βαγόνι. Μας είναι αδιάφορο, κατ' αρχήν, για τον απλό προσδιορισμό ή μάλλον για την περιγραφή της κίνησης, το αν θα ανάγουμε αυτή την κίνηση στο ένα ή το άλλο σύστημα. Όπως προαναφέραμε, αυτό είναι προφανές και δεν πρέπει να το συγχέουμε με την ευρύτερη διατύπωση την οποία ονομάσαμε αρχή της σχετικότητας και θέσαμε ως βάση των ερευνών μας.

Η αρχή αυτή δεν επιβεβαιώνει μονάχα ότι μπορούμε να επιλέξουμε ως σύστημα αναφοράς τόσο το βαγόνι όσο και τις γραμμές για να ορίσουμε οποιαδήποτε κίνηση (μια και αυτό είναι εξίσου προφανές)· μας δείχνει επίσης ότι εάν διατυπώσουμε τους γενικούς φυσικούς νόμους όπως προκύπτουν από τα πειράματα:

α. είτε επιλέξουμε ως σύστημα αναφοράς τις γραμμές

β. είτε επιλέξουμε ως σύστημα αναφοράς το βαγόνι οι νόμοι αυτοί είναι εντελώς πανομοιότυποι και στις δύο περιπτώσεις (για παράδειγμα οι νόμοι της μηχανικής είτε ο νόμος της διάδοσης του φωτός στο κενό). Όλα τα συστήματα αναφοράς K, K΄ είναι όμοια για τη φυσική περιγραφή των φυσικών φαινομένων. Η τελευταία αυτή διατύπωση δεν είναι απαραιτήτως *εκ προοιμίου* αληθής όπως η πρώτη· δεν περιλαμβάνεται στις έννοιες της κίνησης και του συστήματος αναφοράς ούτε προκύπτει εξ αυτών άμεσα: μονάχα τα πειράματα μπορούν να την επικυρώσουν ή όχι.

Ωστόσο δεν έχουμε αναφερθεί καθόλου μέχρι στιγμής στην ισοδυναμία όλων των συστημάτων αναφοράς K ως προς τη διατύπωση των φυσικών νόμων. Αυτή είναι περίπου η οδός που ακολουθήσαμε. Ξεκινούσαμε κατά πρώτον από την υπόθεση ότι υπάρχει ένα σύστημα αναφοράς K με κίνηση τέτοια που επιδεχόταν να εφαρμόσουμε ως προς αυτήν την αρχή του Γαλιλαίου:* Ένα υλικό σημείο, αφημένο στον εαυτό του και επαρκώς απομακρυσμένο από οποιαδήποτε άλλη μάζα του χώρου, κινείται με κίνηση ευθύγραμμη και ομαλή. Οι φυσικοί νόμοι έπρεπε να είναι οι απλούστεροι δυνατοί σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του Γαλιλαίου K. Επιπλέον, όλα τα συστήματα αναφοράς K΄ που κινούνται με κίνηση ευθύγραμμης και ομαλής μετάβασης και απαλλαγμένα από κάθε περιστροφική κίνηση ως προς το K έπρεπε ομοίως να χαίρουν της ίδιας ιδιότητας και να είναι απολύτως ισοδύναμα με το K΄ για τη διατύπωση των φυσικών νόμων. Όλα αυτά τα συστήματα αναφοράς τα ονομάσαμε Γαλιλαϊκά συστήματα αναφοράς. Δεχτήκαμε την αρχή της σχετικότητας μονάχα για αυτά τα συστήματα αναφοράς και όχι για εκείνα που κινούνται με διαφορετική κίνηση. Σε αυτό το πνεύμα κάνουμε λόγο για την αρχή ή θεωρία της ειδικής σχετικότητας.

Αντιθέτως, θα εννοήσουμε ως αρχή της γενικής σχετικότητας την ακόλουθη διατύπωση: Όποιες κι αν είναι οι κινήσεις τους, όλα τα συστήματα αναφοράς K, K΄ είναι ισοδύναμα από την πλευρά της έκφρασης των φυσικών νόμων. Ας σημειώσουμε όμως παρευθύς ότι θα χρειαστεί αργότερα να αντικαταστήσουμε τη διατύπωση αυτή με μια πιο αφηρημένη, για λόγους που θα εμφανιστούν προοδευτικά στην πορεία.

Αφότου λάβαμε γνώση για την αρχή της ειδικής σχετικότητας, οποιοδήποτε πνεύμα ακόρεστο για γενίκευση θα γοητευτεί ιδιαιτέρως από την ιδέα να επιχειρήσει το βήμα που το χωρίζει από την αρχή της γενικής σχετικότητας. Μια απλή παρατήρηση, φαινομενικά πολύ θεμελιωμένη, μας κάνει αρχικά να σκεφτούμε ότι μια τέτοια απόπειρα δεν πρόκειται να ευδοκιμήσει. Ας μεταφερθεί ο αναγνώστης νοητικά στο εν λόγω εξεταζόμενο βαγόνι που μετακινείται με ομαλή κίνηση. Όσο το βαγόνι προχωράει με ομαλή ταχύτητα, ο επιβάτης του δεν αντιλαμβάνεται καθόλου την κίνηση. Έτσι, τείνει μάλλον να σκεφτεί ότι το βαγόνι είναι ακίνητο κι ότι αυτό

* (ΣτΜ) Αυτός είναι ουσιαστικά και ο πρώτος νόμος του Νεύτωνα, ο νόμος της αδράνειας.

που κινείται είναι οι γραμμές του. Σύμφωνα, άλλωστε, με την ειδική αρχή της σχετικότητας, η ερμηνεία αυτή επαληθεύεται εξίσου απόλυτα από φυσικής πλευράς.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι η κίνηση του βαγονιού παύει να είναι ομαλή εξαιτίας ενός απότομου φρεναρίσματος· ο επιβάτης μέσα στο βαγόνι υφίσταται ένα εξίσου απότομο τράνταγμα προς τα εμπρός. Η επιβραδυμένη κίνηση του βαγονιού εκδηλώνεται με τη μηχανική συμπεριφορά των σωμάτων ως προς αυτό· η μηχανική αυτή στάση δεν είναι η ίδια με την περίπτωση που εξετάστηκε προηγουμένως και γι' αυτό δεν φαίνεται δυνατό να ισχύουν οι ίδιοι μηχανικοί νόμοι αναφορικά με το βαγόνι που κινείται με μη ομαλή κίνηση και αναφορικά με το ακίνητο ή το ομαλά κινούμενο βαγόνι. Όπως και να' χει, είναι βέβαιο ότι η βασική αρχή του Γαλιλαίου δεν ισχύει για το βαγόνι που κινείται με μη ομαλή κίνηση. Αισθανόμαστε επομένως υποχρεωμένοι να αποδώσουμε κατ' αρχάς, ενάντια στην αρχή της σχετικότητας, ένα είδος απόλυτης φυσικής πραγματικότητας σε μια μη ομαλή κίνηση. Θα δούμε όμως στη συνέχεια ότι το συμπέρασμα αυτό δεν στέκει.

19ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Το βαρυτικό πεδίο

Γιατί μια πέτρα, την οποία αφήνουμε να πέσει αφότου τη σηκώσουμε, πέφτει στη Γη; Κατά κανόνα στην ερώτηση αυτή απαντάμε ως εξής: γιατί έλκεται από τη Γη. Η σύγχρονη φυσική δίνει μια λίγο διαφορετική απάντηση για τον ακόλουθο λόγο: από μια βαθύτερη μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων συμπεράναμε ότι δεν υπάρχει άμεση δράση εξ αποστάσεως. Για παράδειγμα, όταν ένας μαγνήτης έλκει ένα κομμάτι σίδερο, δεν πρέπει να αρκεστούμε στη σκέψη ότι ο μαγνήτης δρα άμεσα στο σίδερο μέσω του κενού χώρου που τα χωρίζει αλλά πρέπει μάλλον να σκεφτούμε, σύμφωνα με τον Φαραντέι, ότι ο μαγνήτης δημιουργεί πάντοτε σε κάθε περιβάλλοντα χώρο του κάτι πραγματικό το οποίο ονομάζουμε μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μαγνητικό πεδίο επιδρά με τη σειρά του στο κομμάτι σίδερο, έτσι ώστε το τελευταίο να τείνει να μετακινηθεί προς τον μαγνήτη. Δεν θέλουμε να επεκταθούμε εδώ στην επαλήθευση αυτής της –καθαυτής αυθαίρετης– ενδιάμεσης έννοιας. Ας σημειώσουμε μονάχα ότι μπορούμε, χάρη σε αυτή, να εξηγήσουμε θεωρητικά και με πολύ ικανοποιητικότερο τρόπο απ' ό,τι χωρίς αυτήν, τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, και ιδίως τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Με ανάλογο τρόπο αντιλαμβανόμαστε και τα φαινόμενα της βαρύτητας.

Η Γη επιδρά έμμεσα πάνω στην πέτρα δημιουργώντας γύρω της ένα βαρυτικό πεδίο. Αυτό επιδρά πάνω στην πέτρα και προκαλεί την πτωτική του κίνηση. Πειράματα μάς διδάσκουν ότι η ισχύς αυτής της δράσης σε ένα σώμα ελαττώνεται σύμφωνα με έναν νόμο τέλεια προσδιορισμένο όσο απομακρυνόμαστε από τη Γη. Που σημαίνει, σύμφωνα με τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τα πράγματα: Ο νόμος που διέπει τις ιδιότητες, στον χώρο, ενός βαρυτικού πεδίου πρέπει να είναι απόλυτα προσδιορισμένος ώστε να αντιπροσωπεύει με ακρίβεια την ελάττωση της δράσης της βαρύτητας ανάλογα με την απόσταση του σώματος. Φανταζόμαστε περίπου ότι το σώμα (η Γη για παράδειγμα) δημιουργεί άμεσα το πεδίο στο άμεσο περιβάλλον της· σε μια μεγαλύτερη απόσταση, η ένταση και η διεύθυνση του πεδίου προσδιορίζονται τότε από τον νόμο που διέπει τις ιδιότητες στον χώρο των καθαυτών βαρυτικών πεδίων.

Το βαρυτικό πεδίο παρουσιάζει, αντίθετα με τα ηλεκτρικά και μαγνητική πεδία, μια εξαιρετικά αξιοσημείωτη ιδιότητα, θεμελιώδους σημασίας για τη συνέχεια. Τα σώματα, που μετατοπίζονται αποκλειστικά υπό την επίδραση του βαρυτικού πεδίου, υφίστανται μια επιτάχυνση που δεν εξαρτάται καθόλου ούτε από το υλικό ούτε από τη φυσική κατάσταση του σώματος. Στο κενό, ένα κομμάτι μόλυβδος και ένα κομμάτι ξύλο επί παραδείγματι πέφτουν με την ίδια ταχύτητα στο πεδίο βαρύτητας, εάν τα αφήσουμε να πέσουν χωρίς ή με την ίδια αρχική ταχύτητα. Μπορούμε να διατυπώσουμε λίγο διαφορετικά αυτόν τον ακριβέστατο νόμο χάρη στην ακόλουθη παρατήρηση.

Σύμφωνα με τον νόμο της κίνησης του Νεύτωνα, έχουμε την ακόλουθη εξίσωση:

(δύναμη) = (αδρανειακή μάζα) x (επιτάχυνση)

όπου η αδρανειακή μάζα αντιπροσωπεύει μια χαρακτηριστική σταθερά του κινητού σώματος. Εάν όμως θεωρήσουμε το βάρος ως δύναμη επιτάχυνσης, έχουμε από την άλλη:

(δύναμη) = (βαρυτική μάζα) x (ένταση του βαρυτικού πεδίου).

Όπου η βαρυτική μάζα αντιπροσωπεύει επίσης μια χαρακτηριστική σταθερά του σώματος. Από τις δύο αυτές σχέσεις συνάγουμε:

(επιτάχυνση) = [(βαρυτική μάζα)/(αδρανειακή μάζα)] x (ένταση του βαρυτικού πεδίου).

Πειραματικά αποδεικνύεται ότι, για ένα δεδομένο βαρυτικό πεδίο, η επιτάχυνση είναι πάντοτε η ίδια και είναι ανεξάρτητη από τη φύση και την κατάσταση του σώματος· συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η σχέση της μάζας βάρους προς τη μάζα αδρανείας είναι ομοίως η ίδια για όλα τα σώματα. Μπορούμε άρα, επιλέγοντας καταλλήλως τις μονάδες, να κάνουμε τη σχέση αυτή ίση προς 1· έχουμε επομένως την ακόλουθη διατύπωση: η βαρυτική μάζα και η αδρανειακή μάζα ενός σώματος είναι ίδιες.

Μέχρι στιγμής, η μηχανική έχει καταγράψει αυτή τη σημαντική πρόταση αλλά δεν την έχει ερμηνεύσει. Μπορούμε να καταλήξουμε σε μια ικανοποιητική ερμηνεία μόνον εάν δεχτούμε ότι η ίδια ιδιότητα ενός σώματος εκδηλώνεται ανάλογα με τις περιστάσεις είτε ως αδράνεια είτε ως βάρος. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δείξουμε πώς αυτό το ερώτημα συνδέεται με το αξίωμα της γενικής σχετικότητας.

20ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Η ισοδυναμία της αδρανειακής μάζας και της βαρυτικής μάζας ως επιχείρημα υπέρ του αξιώματος της γενικής σχετικότητας

Ας φανταστούμε ένα μεγάλο μέρος κενού χώρου τόσο απομακρυσμένο από κάθε αστέρα και κάθε σημαντική μάζα ώστε να βρεθούμε με πολύ μεγάλη προσέγγιση στην περίπτωση που προβλέπει ο θεμελιώδης νόμος του Γαλιλαίου. Είναι τότε δυνατόν να επιλέξουμε, για αυτό το μέρος του κόσμου, ένα σύστημα αναφοράς του Γαλιλαίου σύμφωνα με το οποίο τα ακίνητα σημεία παραμένουν ακίνητα και τα κινούμενα σημεία διατηρούν συνεχώς μια ευθύγραμμη και ομοιόμορφη κίνηση. Ας φανταστούμε επίσης ως σύστημα αναφοράς ένα τεράστιο κουτί, σε σχήμα δωματίου, κι ας υποθέσουμε ότι στο εσωτερικό του βρίσκεται ένας παρατηρητής εξοπλισμένος με μηχανήματα. Γι' αυτόν δεν υφίσταται βεβαίως βαρύτητα. Πρέπει να προσδεθεί στο έδαφος με σχοινιά για να μην αναληφθεί σιγά προς το ταβάνι του δωματίου στην παραμικρή πρόσκρουση στο πάτωμα.

Ας φανταστούμε ακόμη ότι στο εξωτερικό του κουτιού και στο μέσο της οροφής βρίσκεται ένας γάντζος στερεωμένος με σχοινιά κι ότι ένας άνθρωπος ασκεί πάνω του μια ομοιόμορφη έλξη κατ' αυθαίρετο τρόπο. Το κουτί και ο παρατηρητής αρχίζουν τότε να ίπτανται με ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση προς «τα επάνω». Η ταχύτητά τους θα έτεινε με τον χρόνο προς το άπειρο, εάν θεωρούσαμε αυτό το σύνολο αναφορικά με ένα άλλο σύστημα αναφοράς στο οποίο δεν θα ασκούσαμε έλξη με το σχοινί.

Τι συμβαίνει όμως για έναν παρατηρητή μέσα στο κουτί; Την επιτάχυνση του κουτιού την αντιλαμβάνεται με τη μέσω της αντίδρασης του πατώματος. Πρέπει να απορροφήσει αυτή την πίεση μέσω των ποδιών του εάν δεν θέλει να σωριαστεί στο έδαφος. Στέκεται λοιπόν μέσα στο κουτί ακριβώς όπως ένας άνθρωπος στέκεται μέσα σε ένα δωμάτιο σπιτιού. Εάν αφήσει ένα αντικείμενο που κρατούσε στο χέρι του, η επιτάχυνση του κουτιού δεν θα μεταδίδεται πια στο σώμα αυτό και θα πλησιάσει τον πάτο του κουτιού με μια επιταχυνόμενη σχετική κίνηση. Ο παρατηρητής θα παρατηρήσει εκείνη τη στιγμή ότι η επιτάχυνση του σώματος σε σχέση με το πάτωμα είναι πάντοτε η ίδια, όποιο κι αν είναι το σώμα με το οποίο εκτελεί το πείραμα.

Βασιζόμενος λοιπόν στις γνώσεις του σχετικά με το βαρυτικό πεδίο, για το οποίο μιλήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο παρατηρητής θα καταλήξει στο συμπέρασμα ότι βρίσκεται, όπως και το κουτί, σε ένα βαρυτικό πεδίο αμετάβλητο στον χρόνο. Αρχικά θα εκπλαγεί με το γεγονός ότι το κουτί δεν πέφτει μέσα σε αυτό το βαρυτικό πεδίο. Με το που θα ανακαλύψει όμως τον γάντζο στη μέση του ταβανιού και το τεντωμένο σχοινί που έχει προσδεθεί πάνω του, θα συμπεράνει ότι το κουτί κρέμεται με τρόπο ώστε να στέκεται ακίνητο στο πεδίο βαρύτητας.

Μπορούμε άραγε να υπομειδιάσουμε και να αποφανθούμε ότι ο παρατηρητής σφάλλει; Δεν το νομίζω, εάν θέλουμε να είμαστε συνεπείς προς τον εαυτό μας· πρέπει ακόμη να προσθέσουμε ότι αυτός ο τρόπος αντίληψης των πραγμάτων δεν αντιβαίνει ούτε τη λογική ούτε τους γνωστούς νόμους της μηχανικής. Μπορούμε να θεωρήσουμε ακίνητο το κουτί, παρόλο που κινείται με μια επιταχυνόμενη κίνηση ως προς τον χώρο του Γαλιλαίου που εξετάστηκε προηγουμένως. Υπάρχει επομένως τρόπος να προεκτείνουμε την αρχή της σχετικότητας σε σώματα που κινούνται με επιταχυνόμενη κίνηση τα μεν σε σχέση προς τα δε κι έτσι κερδίζουμε ένα σοβαρό επιχείρημα υπέρ μιας αρχής της γενικής σχετικότητας.

Πρέπει βεβαίως να σημειώσουμε ότι η δυνατότητα μιας τέτοιας αντίληψης στηρίζεται στη θεμελιώδη αντίληψη του βαρυτικού πεδίου να προσδίδει την ίδια επιτάχυνση σε όλα τα σώματα είτε, πράγμα που είναι προφανές, στην πρόταση της ισότητας της βαρυτικής μάζας και της αδρανειακής μάζας. Εάν δεν υπήρχε αυτός ο φυσικός νόμος, ο παρατηρητής εντός του κουτιού, θα αδυνατούσε να εξηγήσει τη συμπεριφορά των γύρω του σωμάτων με την υπόθεση ενός βαρυτικού πεδίου, κι η εμπειρία δεν θα του επέτρεπε να θεωρήσει ακίνητο το σύστημα αναφοράς του. Ας υποθέσουμε ότι ο παρατηρητής μέσα στο κουτί στερεώνει εσωτερικά ένα σχοινί στο ταβάνι και ότι κρεμάει ένα σώμα στο ελεύθερο άκρο του. Το σχοινί θα παραμείνει τεντωμένο και κατακόρυφο υπό την επίδραση του προκείμενου σώματος. Ας αναζητήσουμε τον λόγο για τον οποίο το σχοινί είναι τεντωμένο. Ο παρατηρητής μέσα στο κουτί θα πει: το κρεμασμένο σώμα υφίσταται μέσα στο βαρυτικό πεδίο μια δύναμη κατευθυνόμενη προς τα κάτω στην οποία ισορροπεί η τάση του σχοινιού. Η βαρυτική μάζα του κρεμασμένου σώματος καθορίζει το μέγεθος του τεντώματος [της τάσης] του σχοινιού. Από την άλλη, όμως, ένας ελεύθερος στον χώρο παρατηρητής θα κρίνει το φαινόμενο ως εξής: το σχοινί παρασύρεται από την επιταχυνόμενη κίνηση του κουτιού και τη μεταδίδει στο σώμα που είναι κρεμασμένο πάνω του. Η τάση του σχοινιού είναι τέτοια ώστε μπορεί μόλις να παράγει την επιτάχυνση του σώματος. Η αδρανειακή μάζα του σώματος καθορίζει την τάση του σχοινιού. Θα δούμε, σύμφωνα με αυτό το πείραμα, ότι η προέκταση της αρχής της σχετικότητας συνεπάγεται υποχρεωτικά την πρόταση ισότητας της βαρυτικής μάζας και της αδρανειακής. Έτσι φτάνουμε σε μια φυσική ερμηνεία αυτής της πρότασης.

Βλέπουμε, εξετάζοντας το κουτί που κινείται με μια επιταχυνόμενη κίνηση, ότι μια θεωρία της γενικής σχετικότητας θα δώσει σημαντικά συμπεράσματα αναφορικά με τους νόμους της βαρύτητας. Πράγματι, η λογική ανάπτυξη της ιδέας της γενικής σχετικότητας διατύπωσε νόμους τους οποίους επαληθεύει το βαρυτικό πεδίο. Οφείλω, ωστόσο, από τώρα να προειδοποιήσω τον αναγνώστη σχετικά με μια παρανόηση που θα μπορούσε να προκύψει από τούτες τις παρατηρήσεις. Υπάρχει ένα βαρυτικό πεδίο για τον παρατηρητή μέσα στο κουτί, ακόμα κι αν δεν ισχύει το ίδιο για το πρώτο σύστημα συντεταγμένων που επιλέξαμε. Θα αφηνόμασταν επομένως εύκολα να σκεφτούμε ότι η ύπαρξη ενός βαρυτικού πεδίου είναι πάντοτε προφανής. Θα μπορούσαμε να φανταστούμε ότι όποιο κι αν είναι το θεωρούμενο βαρυτικό πεδίο, μπορούμε πάντοτε να επιλέξουμε ένα άλλο σύστημα αναφοράς ως προς το οποίο δεν υπάρχει βαρυτικό πεδίο. Τούτο όμως επ' ουδενί δεν αληθεύει για όλα τα βαρυτικά πεδία και δεν ισχύει παρά μόνον για εκείνα που έχουν μια πολύ ιδιαίτερη δομή. Είναι αδύνατον, για παράδειγμα, να επιλέξουμε ένα τέτοιο σύστημα αναφοράς ως προς το οποίο το βαρυτικό πεδίο της Γης (σε όλο της το εύρος) θα εξαφανιζόταν εντελώς.

Καταλαβαίνουμε τώρα γιατί το επιχείρημα που αναπτύχθηκε στο τέλος του 17ου κεφαλαίου κατά της αρχής της σχετικότητας δεν έχει αποδεικτική ισχύ. Είναι αλήθεια ότι ο παρατηρητής μέσα σε βαγόνι που φρενάρει αισθάνεται, ως αποτέλεσμα του φρεναρίσματος, ένα σπρώξιμο προς τα εμπρός κι ότι αντιλαμβάνεται έτσι τη μη ομαλή ταχύτητα (την επιτάχυνση) του τρένου. Κανείς όμως δεν τον υποχρεώνει να αποδώσει αυτό το τράνταγμα σε μια πραγματική επιτάχυνση του βαγονιού. Μπορεί να το ερμηνεύσει ως εξής: το σύστημα αναφοράς μου (το βαγόνι) παραμένει διαρκώς ακίνητο. Ως προς τον ίδιο όμως κυριαρχεί (κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος) ένα βαρυτικό πεδίο κατευθυνόμενο προς τα εμπρός και ποικίλο ανάλογα με τον χρόνο. Υπό την επίδραση του τελευταίου, οι γραμμές όπως επίσης και η Γη μετατοπίζονται με μη ομαλή κίνηση έτσι ώστε η αρχική της ταχύτητα, κατευθυνόμενη προς τα πίσω, ελαττώνεται διαρκώς. Αυτό το βαρυτικό πεδίο είναι η αιτία του τραντάγματος του επιβάτη παρατηρητή.

21ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Ως προς τι είναι ανεπαρκείς οι βάσεις της κλασικής μηχανικής και της ειδικής σχετικότητας;

Όπως ήδη επισημάναμε, η κλασική μηχανική ξεκινά από την εξής αρχή: τα υλικά σημεία τα επαρκώς απομακρυσμένα από άλλα υλικά σημεία είτε κινούνται με ομοιόμορφη ευθύγραμμη κίνηση είτε παραμένουν ακίνητα. Παρατηρήσαμε επίσης πολλές φορές ότι ο θεμελιώδης αυτός νόμος δεν μπορεί να αληθεύει παρά για τα συστήματα αναφοράς K, τα οποία κινούνται με ορισμένες ιδιαίτερες κινήσεις και κινούνται τα μεν ως προς τα δε με μια ομοιόμορφη κίνηση μεταβίβασης. Η πρόταση δεν αληθεύει αναφορικά με άλλα συστήματα αναφοράς. Τόσο στη κλασική μηχανική όσο και στην ειδική θεωρία της σχετικότητας διακρίνουμε συνεπώς τα συστήματα αναφοράς K για τα οποία αληθεύουν οι φυσικοί νόμοι από τα συστήματα αναφοράς για τα οποία δεν αληθεύουν.

Κανένα λογικό πνεύμα όμως δεν μπορεί να είναι ικανοποιημένο με αυτή την κατάσταση πραγμάτων. Τίθεται η ακόλουθη ερώτηση: πώς είναι δυνατόν ορισμένα συστήματα αναφοράς (ή μάλλον η κινητική τους κατάσταση) να διακρίνονται από άλλα συστήματα (ή μάλλον από την κινητική τους κατάσταση); Ποιος είναι ο λόγος αυτής της διάκρισης; Θα χρησιμοποιήσω μια σύγκριση για να δείξω καθαρά τι σημαίνει αυτό το ερώτημα.

Θεωρώ μία εστία υγραερίου στην οποία βρίσκονται δύο χύτρες τόσο πανομοιότυπες που είναι αδύνατον να τις ξεχωρίσουμε. Και οι δύο είναι μισογεμάτες με νερό. Παρατηρώ ότι ο ατμός βγαίνει ασταμάτητα από τη μία χύτρα αλλά όχι κι από την άλλη. Το γεγονός θα με εξέπληττε, πόσο μάλλον εάν δεν είχα δει ποτέ μου ούτε εστία υγραερίου ούτε χύτρα. Η έκπληξή μου διαλύεται όμως άπαξ και παρατηρήσω κάτω από την πρώτη χύτρα κάτι γαλάζιο και φλεγόμενο, και απολύτως τίποτε κάτω από τη δεύτερη (ακόμη κι αν πρωτοαντικρύζω φλόγα υγραερίου). Θα έλεγα, βέβαια, ότι αυτό το γαλάζιο κάτι είναι η αιτία της εκφυγής του ατμού ή, εν πάση περιπτώσει, ότι είναι μάλλον η αιτία του. Εάν όμως δεν παρατηρήσω τίποτε κάτω από καμία χύτρα κι αν διαπιστώσω ότι μία από τις δύο εξατμίζει συνεχώς ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο και στην άλλη, θα εκπλαγώ και δεν θα μείνω ικανοποιημένος παρά μόνον εάν ορίσω μία περίσταση στην οποία να μπορώ να αποδώσω τη διαφορετική συμπεριφορά της κάθε χύτρας.

Με ανάλογο τρόπο, μάταια αναζητώ στην κλασική μηχανική (ή μάλλον στη θεωρία της ειδικής σχετικότητας) κατιτί πραγματικό στο οποίο θα μπορούσα να αποδώσω τη διαφορετική συμπεριφορά των σωμάτων ως προς τα συστήματα αναφοράς K και K΄. Ο Νεύτωνας είχε ήδη δει αυτή την αντίφαση αλλά μάταια προσπάθησε να δώσει μία απάντηση. Εκείνος που την αναγνώρισε καθαρότερα ήταν ο Ε. Μαχ[19] και απαίτησε, εξαιτίας της, να θεμελιωθεί η φυσική σε άλλες βάσεις. Μπορούμε να αντιπαρέλθουμε αυτή τη δυσκολία μονάχα με μια φυσική σύμφωνα με την αρχή της γενικής σχετικότητας. Οι εξισώσεις αυτής της θεωρίας αληθεύουν για οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς, όποια κι αν είναι η κινητική του κατάσταση.

---

19. Ερνστ Μαχ (1838-1916), Αυστριακός φυσικός και φιλόσοφος. Η φιλοσοφία του είναι μια απόπειρα περιγραφής του συνόλου της εμπειρίας, ξεκινώντας από τις αισθήσεις και τους νόμους που τη συνέχουν χωρίς να παρεμβάλλει τις έννοιες της υπόστασης, της αιτιότητας, κ.λπ. Η κριτική του στις αρχές της νευτώνειας μηχανικής επηρέασε τις ιδέες του Αϊνστάιν.

22ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Μερικές συνέπειες της αρχής της γενικής σχετικότητας

Οι σκέψεις του 20ού κεφαλαίου δείχνουν ότι η αρχή της γενικής σχετικότητας μάς επιτρέπει να συνάγουμε τις ιδιότητες του βαρυτικού πεδίου χάρη σε μια αμιγώς θεωρητική διαδικασία. Ας υποθέσουμε ότι γνωρίζουμε την πορεία, στον χώρο και τον χρόνο, ενός οποιουδήποτε φυσικού φαινομένου που συνέβη σε μια περιοχή του Γαλιλαίου ως προς ένα σύστημα αναφοράς του Γαλιλαίου Κ. Μπορούμε τότε να βρούμε με τη βοήθεια καθαρά θεωρητικών πράξεων, δηλαδή απλώς με υπολογισμό, τον τρόπο με τον οποίο αυτό το γνωστό φαινόμενο συμπεριφέρεται ως προς ένα σύστημα αναφοράς κινούμενο με μια επιταχυνόμενη κίνηση σε σχέση με το Κ. Καθώς όμως υπάρχει ένα βαρυτικό πεδίο ως προς το νέο σύστημα αναφοράς Κ΄, συνάγουμε έτσι από τον συλλογισμό πώς το βαρυτικό πεδίο επηρεάζει το προς μελέτη φαινόμενο.

Μαθαίνουμε έτσι ότι ένα σώμα κινούμενο ευθύγραμμα και ομαλά ως προς το Κ (που απαντά στην αρχή του Γαλιλαίου) κινείται, σε σχέση με το σύστημα αναφοράς Κ΄ που κινείται με μια επιταχυνόμενη κίνηση (το κουτί), με μια επιταχυνόμενη και γενικά καμπυλόγραμμη κίνηση. Αυτή η επιτάχυνση ή αυτή η καμπύλη αντιστοιχεί στην επίδραση, πάνω στο κινούμενο σώμα, του βαρυτικού πεδίου που κυριαρχεί ως προς το Κ΄. Γνωρίζαμε ήδη ότι το βαρυτικό πεδίο επηρεάζει έτσι την κίνηση των σωμάτων, με αποτέλεσμα αυτή η συλλογιστική να μην μας διδάσκει τίποτε το καινούργιο κατ' αρχήν.

Αντιθέτως, έχουμε ένα καινούργιο αποτέλεσμα θεμελιώδους σημασίας όταν εφαρμόζουμε αυτή τη συλλογιστική σε μια φωτεινή ακτίνα. Διαδίδεται, σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του Γαλιλαίου, ευθύγραμμα και με ταχύτητα c. Σε σχέση όμως με το κουτί που κινείται με επιταχυνόμενη κίνηση (σύστημα αναφοράς Κ΄), η τροχιά αυτής της φωτεινής ακτίνας εύκολα αποδεικνύεται ότι δεν είναι πλέον ευθύγραμμη. Πρέπει να συμπεράνουμε εξ αυτού ότι οι φωτεινές ακτίνες δεν διαδίδονται εν γένει ευθύγραμμα εντός των βαρυτικών πεδίων. Το συμπέρασμα αυτό είναι σημαντικότατο από δύο πλευρές.

Κατ' αρχάς είναι εμπειρικά επαληθεύσιμο. Εάν ένας λεπτομερής συλλογισμός δείχνει ότι η καμπύλη των φωτεινών ακτίνων, υπολογισμένη βάσει της θεωρίας της γενικής σχετικότητας, δεν είναι παρά ελάχιστη για τα βαρυτικά πεδία που μπορούμε να μελετήσουμε, πρέπει να φτάνει τα 1,7 δεύτερα του τόξου για τις φωτεινές ακτίνες που διαδίδονται εφαπτόμενες στον Ήλιο. Θα έπρεπε να προκύπτει εξ αυτού ότι οι απλανείς αστέρες που παρατηρούνται κοντά στον Ήλιο –οι οποίοι μπορούν να παρατηρηθούν σε στιγμή ολικής έκλειψης– πρέπει να μας φαίνονται απομακρυσμένοι από τον Ήλιο συγκριτικά με τη θέση που κατέχουν στον ουρανό όταν ο

Ήλιος είναι διαφορετικά τοποθετημένος. Η διερεύνηση της επαλήθευσης ή μη αυτής της συνέπειας είναι ένα έργο μείζονος σημασίας. Ελπίζουμε οι αστρονόμοι να βρουν μελλοντικά κάποια λύση.[20]

Κατά δεύτερο λόγο, η συνέπεια αυτή δείχνει ότι, σύμφωνα με τη γενική θεωρία της σχετικότητας, ο νόμος που διατυπώθηκε πολλές φορές ήδη της σταθερότητας της ταχύτητας του φωτός στο κενό, που συνιστά μία από τις δύο θεμελιώδεις υποθέσεις της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας, δεν μπορεί να αξιώνεται μια απεριόριστη ακρίβεια· αυτές οι φωτεινές ακτίνες μπορούν να είναι καμπυλόγραμμες μόνον εάν η ταχύτητα της διάδοσης του φωτός ποικίλλει ανάλογα με τον τόπο. Θα μπορούσαμε να σκεφτούμε ότι η συνέπεια αυτή ανατρέπει την ειδική θεωρία της σχετικότητας και τη θεωρία της σχετικότητας εν γένει. Στην πραγματικότητα όμως τα πράγματα δεν έχουν έτσι. Μπορούμε μονάχα να συμπεράνουμε ότι η ειδική θεωρία της σχετικότητας δεν μπορεί να διεκδικεί ένα απεριόριστο πεδίο αλήθειας· τα αποτελέσματά της ισχύουν μόνον όσο μπορούμε να παραβλέπουμε τις επιδράσεις των βαρυτικών πεδίων στα φαινόμενα (για παράδειγμα στο φως).

Καθώς οι πολέμιοι της θεωρίας της σχετικότητας συχνά δηλώνουν ότι η ειδική θεωρία της σχετικότητας έχει ανατραπεί από εκείνη της γενικής σχετικότητας, θα προσπαθήσω να φωτίσω την πραγματική κατάσταση των πραγμάτων με τη βοήθεια ενός παραδείγματος. Πριν την εμφάνιση της ηλεκτροδυναμικής, οι νόμοι της ηλεκτροστατικής θεωρούνταν απλά νόμοι του ηλεκτρισμού. Σήμερα γνωρίζουμε ότι η ηλεκτροστατική δεν μπορεί να εφαρμοστεί στα ηλεκτρικά πεδία παρά μόνον στην περίπτωση (που ποτέ δεν πραγματώνεται κατά απόλυτο τρόπο) που οι ηλεκτρικές μάζες είναι αυστηρά ακίνητες οι μεν ως προς τις δε και ακίνητες ως προς το σύστημα συντεταγμένων. Άραγε οι εξισώσεις του Μάξγουελ ανέτρεψαν έτσι την ηλεκτροστατική; Επ' ουδενί. Η ηλεκτροστατική θεωρείται μια ακραία περίπτωση ηλεκτροδυναμικής· οι νόμοι της τελευταίας γίνονται ακριβώς οι νόμοι της πρώτης στην περίπτωση που τα πεδία παραμένουν αμετάβλητα στον χρόνο. Αυτή είναι και η ευτυχέστερη μοίρα μιας φυσικής θεωρίας: να ανοίγει τον δρόμο σε μια γενικότερη θεωρία, παραμένοντας μια ιδιάζουσα περίπτωσή της.

Είδαμε, στο προαναφερθέν παράδειγμα της διάδοσης του φωτός, ότι η αρχή της γενικής σχετικότητας μας επιτρέπει να συνάγουμε –μέσω μιας θεωρητικής διαδικασίας– την επίδραση του βαρυτικού πεδίου στη ροή των φαινομένων, όταν ήδη γνωρίζουμε τους νόμους τους στην περίπτωση που δεν υπάρχει βαρυτικό πεδίο. Το

20. Η επαλήθευση αυτή πραγματοποιήθηκε τρία χρόνια αργότερα, κατά τη διάρκεια της ολικής έκλειψης στις 29 Μαΐου 1919. Την προετοιμασία της παρατήρησης την είχε ήδη από το 1917 σχεδιάσει ο βασιλικός αστρονόμος Φρανκ Ντισόν (1868-1939). Το πείραμα το διηύθυνε ο Έντιγκτον. Το θετικό αποτέλεσμα ανακοινώθηκε στον Αϊνστάιν, που δεν το είχε κρίνει απαραίτητο να παραστεί, από τον Λόρεντς και παρουσιάστηκε με εξαιρετικό τρόπο στις 6 Νοεμβρίου 1919 μπροστά στη Βασιλική Ακαδημία της Αγγλίας.

ωραιότερο πρόβλημα στο οποίο η αρχή της σχετικότητας δίνει μία λύση είναι η αναζήτηση των νόμων στους οποίους υπακούει το ίδιο το βαρυτικό πεδίο. Η κατάσταση έχει ως εξής.

Γνωρίζουμε τομείς χρονοχωρικούς όπου συμπεριφέρονται (κατά προσέγγιση) ως Γαλιλαϊκοί με μια κατάλληλη επιλογή συστήματος αναφοράς, δηλαδή τομείς όπου δεν υφίστανται βαρυτικά πεδία. Εάν τώρα αναγάγουμε έναν τέτοιο τομέα σε ένα σύστημα αναφοράς K΄ που κινείται με μια οποιαδήποτε κίνηση, υπάρχει σε σχέση με το K΄ ένα βαρυτικό πεδίο μεταβαλλόμενο ανάλογα με τον χρόνο στον χώρο. Η κατάσταση του τελευταίου εξαρτάται φυσικά από την επιλεγμένη κίνηση του K΄. Ο γενικός νόμος του βαρυτικού πεδίου, σύμφωνα με τη γενική θεωρία της σχετικότητας, πρέπει να επαληθευτεί από όλα τα βαρυτικά πεδία που επιτεύχθηκαν ομοιότροπα. Ακόμα κι αν δεν μπορούμε να δημιουργήσουμε με αυτόν τον τρόπο όλα τα βαρυτικά πεδία, ελπίζουμε ωστόσο ότι δυνάμεθα να συνάγουμε από τη μελέτη αυτών των ιδιαίτερων βαρυτικών πεδίων τον γενικό νόμο της βαρύτητας. Η ελπίδα μας αυτή επαληθεύτηκε στο ακέραιο. Αφότου είδαμε καθαρά τον στόχο, χρειάστηκε –για να τον επιτύχουμε– να υπερβούμε μία ακόμα σοβαρή δυσκολία, την οποία δεν πρέπει να αποκρύψω από τον αναγνώστη, μια και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του ζητήματος. Ας εμβαθύνουμε κατ' αρχάς λίγο στις ιδιότητες ενός χωροχρονικού συνεχούς.

23ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Μεταβολές των ρολογιών και των κανόνων μέτρησης σε ένα σύστημα αναφοράς κινούμενο περιστροφικά

Απέφυγα σκοπίμως να μιλήσω μέχρι εδώ για τη φυσική ερμηνεία των χωροχρονικών ενδείξεων στην περίπτωση της γενικής σχετικότητας. Ευθύνομαι ως εκ τούτου για έναν ορισμένο αριθμό ασυγχώρητων και διόλου αμελητέων λαθών, όπως γνωρίζουμε από την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Είναι επομένως καιρός να καλύψουμε τώρα αυτή την παράλειψη· σημειώνω ωστόσο εξ αρχής ότι η κατανόηση του παρόντος ζητήματος απαιτεί από την πλευρά του αναγνώστη αρκετή υπομονή και μεγάλη αφαιρετική ικανότητα.

Ας εξετάσουμε εκ νέου παντελώς ειδικές περιπτώσεις που ήδη μελετήθηκαν πολλάκις. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε έναν τομέα στον χρόνο και τον χώρο, όπου δεν υπάρχει βαρυτικό πεδίο αναφορικά με ένα σύστημα αναφοράς K καταλλήλως επιλεγμένης κίνησης. Το K είναι άρα ένα σύστημα αναφοράς του Γαλιλαίου ως προς αυτόν τον τομέα και τα αποτελέσματα της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας αληθεύουν ως προς το K. Ας φανταστούμε ότι αναγάγουμε αυτόν τον τομέα σε ένα δεύτερο σύστημα αναφοράς K΄, που κινείται με μια ομαλή περιστροφική κίνηση ως προς το K. Για να συγκεκριμενοποιήσουμε τις ιδέες αυτές, ας φανταστούμε ότι το K΄ παριστάνεται με έναν επίπεδο κυκλικό δίσκο που περιστρέφεται με ομαλή κίνηση μέσα στο επίπεδό του γύρω από το κέντρο του. Ένας παρατηρητής καθισμένος στην περίμετρο του κυκλικού δίσκου K΄ υφίσταται μια δύναμη που ενεργεί κατά τον άξονα της ακτίνας προς το εξωτερικό και η οποία αποδίδεται –από έναν παρατηρητή ακίνητο ως προς το πρώτο σύστημα αναφοράς K– σε ένα αδρανειακό αποτέλεσμα (φυγόκεντρη δύναμη). Ο παρατηρητής που κάθεται στον δίσκο δύναται ωστόσο να θεωρεί τον δίσκο του ένα ακίνητο σύστημα αναφοράς· δικαιοδοτείται να το κάνει χάρη στην αρχή της γενικής σχετικότητας. Αποδίδει τη δύναμη που ασκείται πάνω του και γενικά σε όλα τα ακίνητα σώματα ως προς τον δίσκο σε ένα βαρυτικό πεδίο. Αναμφίβολα η διάδοση στον χώρο αυτού του βαρυτικού πεδίου δεν μπορεί να ανταποκριθεί στη θεωρία της βαρύτητας του Νεύτωνα. Καθώς όμως ο παρατηρητής πιστεύει στη γενική θεωρία της σχετικότητας, η δυσκολία αυτή δεν τον προβληματίζει· δικαίως ελπίζει ότι θα βρεθεί ένας νόμος περί βαρύτητας που δεν θα εξηγεί μονάχα την κίνηση των αστέρων αλλά και το δυναμικό πεδίο που παρατηρήθηκε στον δίσκο.

Ο εν λόγω παρατηρητής κάνει πειράματα στον δίσκο με ρολόγια και βαθμολογημένους κανόνες, προκειμένου –βάσει αυτών των παρατηρήσεων– να διατυπώσει ακριβείς ορισμούς των δεδομένων του χώρου και του χρόνου ως προς τον δίσκο K΄. Τι του διδάσκουν αυτά τα πειράματα;

Φανταζόμαστε δύο ίδια ρολόγια στερεωμένα από τον παρατηρητή το ένα στο κέντρο του δίσκου και το άλλο στην περιφέρειά του, έτσι ώστε να παραμένουν και τα δύο ακίνητα σε σχέση με τον δίσκο. Αναρωτιόμαστε εάν τα δύο αυτά ρολόγια προχωρούν το ίδιο γρήγορα από πλευράς συστήματος του Γαλιλαίου που δεν κινείται με περιστροφική κίνηση. Ως προς αυτό, το ρολόι που βρίσκεται στο κέντρο δεν έχει ταχύτητα, ενώ εκείνο που βρίσκεται στην περιφέρεια κινείται κατά συνέπεια της περιστροφής του δίσκου ως προς ένα K΄. Σύμφωνα με ένα αποτέλεσμα του 12ου κεφαλαίου, το δεύτερο ρολόι προχωρά πάντοτε πιο αργά ανάλογα με ένα K΄ από εκείνο που είναι ακίνητο στο κέντρο του δίσκου. Ο παρατηρητής, τον οποίο φανταζόμαστε καθιστό στο κέντρο σχεδόν του δίσκου δίπλα στο εκεί ρολόι θα έπρεπε να διαπιστώνει, όπως είναι φυσικό, το ίδιο πράγμα. Επομένως ένα ρολόι προχωρά περισσότερο ή λιγότερο γρήγορα στον συγκεκριμένο δίσκο, ή εν γένει σε οποιοδήποτε βαρυτικό πεδίο, ανάλογα με τη θέση που καταλαμβάνει. Δεν είναι άρα δυνατόν να οριστεί ο χρόνος με τη βοήθεια ρολογιών ακίνητων ανάλογα με το σύστημα αναφοράς. Σκοντάφτουμε σε μια παρόμοια δυσκολία όταν προσπαθούμε να εφαρμόσουμε τον ορισμό της συγχρονίας που δόθηκε προηγουμένως, δεν θέλω όμως να εμβαθύνω στο ζήτημα.

Ωστόσο και ο καθορισμός των συντεταγμένων στον χώρο παρουσιάζει επίσης ανυπέρβλητες δυσκολίες. Έτσι, όταν ο παρατηρητής που κινείται μαζί με τον δίσκο ακουμπήσει τον βαθμολογημένο του κανόνα (έναν πολύ μικρό κανόνα συγκριτικά με την ακτίνα του δίσκου) εφαπτόμενα στην περίμετρο του κύκλου, το μήκος του σε σχέση με ένα σύστημα αναφοράς του Γαλιλαίου είναι μικρότερος από 1, διότι, σύμφωνα με το 12ο κεφάλαιο, τα κινούμενα σώματα υφίστανται μια συστολή κατά τον άξονα της κίνησης. Εάν, αντίθετα, θέσει τον βαθμολογημένο του κανόνα κατά την ακτίνα, δεν θα παρατηρήσει καμία συστολή παίρνοντας το Κ ως σύστημα αναφοράς. Συνεπώς, εάν ο παρατηρητής μετρήσει με έναν βαθμολογημένο κανόνα την περίμετρο του δίσκου κι εν συνεχεία τη διάμετρό του κι αν διαιρέσει τους δύο αριθμούς που θα καταγράψει τον μεν με τον δε, δεν θα βρει πηλίκο τον γνωστό αριθμό π = 3,14..., αλλά έναν μεγαλύτερο αριθμό, ενώ για έναν δίσκο ακίνητο ως προς το Κ, φυσικά και θα βρίσκαμε ακριβώς τον αριθμό π. Αποδεικνύουμε άρα ότι οι προτάσεις της ευκλείδειας γεωμετρίας δεν μπορούν να είναι αυστηρά έγκυρες για τον περιστρεφόμενο δίσκο και εν γένει για ένα βαρυτικό πεδίο, τουλάχιστον όσο δίνουμε το μήκος μονάδας στον βαθμολογημένο κανόνα χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τη θέση και την κατεύθυνσή του. Η έννοια της ευθείας γραμμής χάνει επομένως το νόημά της. Δεν μπορούμε άρα να προσδιορίσουμε επακριβώς τις συντεταγμένες x, y, z ως προς τον δίσκο σύμφωνα με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε στη θεωρία της ειδικής σχετικότητας. Εντούτοις, όσο δεν έχουμε ορίσει τι εννοούμε λέγοντας συντεταγμένες και εποχή ενός γεγονότος, οι φυσικοί νόμοι όπου υπεισέρχονται αυτές οι ποσότητες δεν έχουν συγκεκριμένο νόημα για εμάς.

Όλες αυτές οι σκέψεις που σκιαγραφήσαμε μέχρι στιγμής μοιάζει να έχουν τεθεί υπό αμφισβήτηση. Πράγματι, αρκεί να χρησιμοποιήσουμε ένα λεπτό τέχνασμα για να εφαρμόσουμε ορθά το αξίωμα της γενικής σχετικότητας. Οι ακόλουθες παρατηρήσεις θα προετοιμάσουν κατάλληλα τον αναγνώστη.[21]

(Τα κεφάλαια 24-28 παραλείπονται επίσης από τη γαλλική κριτική έκδοση στην οποία στηρίχθηκε η παρούσα μετάφραση).

28ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Ακριβής διατύπωση της αρχής της γενικής σχετικότητας

Είμαστε πλέον σε θέση να δώσουμε μια ακριβή διατύπωση της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, αντί της πρόσκαιρης διατύπωσης που δόθηκε στο 18ο κεφάλαιο. Η φόρμουλα που υιοθετήθηκε τότε: Όλα τα συστή-

---

21. Ο Αϊνστάιν πραγματεύεται στα τέσσερα σύντομα κεφάλαια που ακολουθούν τους ευκλείδειους χώρους, εκείνους όπου από ένα εξωτερικό σημείο σε μία ευθεία μπορούμε να φέρουμε μία και μόνον μία παράλληλο και το σύστημα των καρτεσιανών συντεταγμένων που σχετίζονται με αυτούς. Στη συνέχεια πραγματεύεται μη ευκλείδειους χώρους, εκείνους όπου από ένα εξωτερικό σημείο σε μια ευθεία δεν μπορούμε να φέρουμε καμία ευθεία ή πολλές κι έπειτα το Γκαουσιανό σύστημα συντεταγμένων. Τέλος, δείχνει ότι ο χώρος που είναι ικανός να περιγράψει τον κόσμο σύμφωνα με τη θεωρία της γενικής σχετικότητας δεν είναι ένας Ευκλείδιος χώρος αλλά ένας χώρος κατά Ρίμαν, στον οποίο από ένα εξωτερικό σημείο σε μια ευθεία δεν μπορούμε να φέρουμε καμία παράλληλο (σχετικά με τους χώρους αυτούς, βλέπε τη σημείωση 17).

ματα αναφοράς K, K΄, κ.λπ., είναι ισοδύναμα για την περιγραφή της φύσης (τη διατύπωση των γενικών φυσικών νόμων), όποια κι αν είναι η κινητική τους κατάσταση δεν μπορεί να διατηρηθεί, μια και η χρήση των στερεών συστημάτων αναφοράς δεν είναι γενικά δυνατή για μια μελέτη στον χρόνο και τον χώρο σύμφωνα με τη μέθοδο που υιοθετήθηκε στην ειδική σχετικότητα. Αντικαθιστούμε το σύστημα αναφοράς με το Γκαουσιανό σύστημα συντεταγμένων. Η ακόλουθη πρόταση μεταφέρει επομένως τη θεμελιώδη ιδέα της γενικής σχετικότητας: Όλα τα συστήματα συντεταγμένων του Γκάους είναι κατ' αρχήν ισοδύναμα για τη διατύπωση των γενικών φυσικών νόμων.

Μπορούμε να διατυπώσουμε αυτή την αρχή της γενικής σχετικότητας και με μια άλλη μορφή που δείχνει ακόμα πιο καθαρά ότι αυτή η αρχή είναι μια φυσική γενίκευση της αρχής της ειδικής σχετικότητας. Σύμφωνα με τη θεωρία της ειδικής σχετικότητας, οι εξισώσεις που εκφράζουν τους γενικούς φυσικούς νόμους μετατρέπονται σε εξισώσεις της ίδιας μορφής όταν εισάγουμε –χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του Λόρεντς– αντί για μεταβλητές x, y, z, t θέσης και χρόνου ως προς ένα συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς K του Γαλιλαίου άλλες μεταβλητές x', y', z', t' ως προς ένα νέο σύστημα αναφοράς K΄. Αντιθέτως, σύμφωνα με τη θεωρία της γενικής σχετικότητας, οι εξισώσεις αυτές πρέπει να μετασχηματιστούν σε εξισώσεις της ίδιας μορφής μέσω μιας οποιασδήποτε υποκατάστασης των μεταβλητών του Γκάους x_1, x_2, x_3, x_4· καθώς οποιοσδήποτε μετασχηματισμός (και όχι μόνο ο μετασχηματισμός του Λόρεντς) αντιστοιχεί σε μία αλλαγή συστήματος συντεταγμένων του Γκάους.

Εάν δεν θέλουμε να αρνηθούμε τον συνηθισμένο τρισδιάστατο μόνο τρόπο θέασης, μπορούμε να χαρακτηρίσουμε, ως ακολουθεί, την ανάπτυξη των θεμελιωδών ιδεών της θεωρίας της γενικής σχετικότητας. Η ειδική σχετικότητα εξετάζει τους Γαλιλαιικούς τομείς, τομείς δηλαδή όπου δεν υπάρχει βαρυτικό πεδίο. Χρησιμοποιούμε ως σύστημα αναφοράς ένα σύστημα αναφοράς του Γαλιλαίου, δηλαδή ένα στερεό σώμα κίνησης τέτοιας ώστε να αληθεύει, ως προς αυτό, η αρχή του Γαλιλαίου περί ευθύγραμμης κίνησης των απομονωμένων υλικών σημείων.

Ορισμένες παρατηρήσεις μάς κάνουν να αναγάγουμε αυτούς τους τομείς του Γαλιλαίου σε συστήματα αναφοράς που δεν είναι του Γαλιλαίου. Υπάρχει, λοιπόν, ως προς αυτά, ένα βαρυτικό πεδίο ιδιαίτερου είδους.

Δεν υπάρχουν όμως στα βαρυτικά πεδία στερεά σώματα που να απολαμβάνουν ευκλείδειες ιδιότητες. Γι' αυτόν τον λόγο η λειτουργία του στερεού συστήματος αναφοράς λείπει από τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Η λειτουργία των ρολογιών επηρεάζεται από τα βαρυτικά πεδία, ούτως ώστε ένας φυσικός ορισμός του χρόνου με τη βοήθεια αυτών των ρολογιών να μην έχει καθόλου τον ίδιο βαθμό προφάνειας όπως στην ειδική σχετικότητα.

Γι' αυτό και χρησιμοποιούμε μη στερεά συστήματα αναφοράς, που όχι μόνο κινούνται –όπως όλα τα σώματα– με αυθαίρετη κίνηση αλλά και υφίστανται κατά την κίνησή τους αλλαγές αυθαίρετης μορφής. Για να ορίσουμε τον χρόνο, χρησιμοποιούμε ρολόγια εντελώς αυθαίρετης λειτουργίας –όσο άτακτη κι αν είναι– που τα φαντazόμαστε προσηλωμένα το καθένα σε ένα σημείο του μη αυστηρού συστήματος αναφοράς και που πληρούν μία μόνο προϋπόθεση: οι παρατηρούμενες ενδείξεις των ρολογιών που είναι τοποθετημένα σε εγγύτητα μεταξύ τους διαφέρουν απειροελάχιστα. Αυτό το μη αυστηρό σύστημα αναφοράς, το οποίο δικαιολογημένα θα μπορούσαμε να κατονομάσουμε ελαστικό σύστημα αναφοράς είναι, ουσιαστικά, ισοδύναμο με ένα τυχαίο Γκαουσιανό σύστημα συντεταγμένων σε τέσσερις διαστάσεις. Αυτό που δίνει στο ελαστικό σύστημα, έναντι του Γκαουσιανού συστήματος συντεταγμένων, μια κάποια διαύγεια είναι η διατήρηση από πλευράς μορφής (αδικαιολόγητη, πράγματι, διατήρηση) της καθαυτής ύπαρξης των συντεταγμένων του χώρου έναντι των συντεταγμένων του χρόνου. Κάθε σημείο του ελαστικού συστήματος αναφοράς θεωρείται ως σημείο του χώρου, κάθε ακίνητο υλικό σημείο σε σχέση με αυτό ως απλά ακίνητο ενόσω το ελαστικό σύστημα εκλαμβάνεται ως σύστημα αναφοράς. Η αρχή της γενικής σχετικότητας επιβάλλει όλα τα ελαστικά συστήματα να δύνανται να εκλαμβάνονται –και μάλιστα με την ίδια επιτυχία– ως συστήματα αναφοράς για τη διατύπωση των γενικών φυσικών νόμων· οι νόμοι αυτοί οφείλουν να είναι εντελώς ανεξάρτητοι από την επιλογή του ελαστικού συστήματος.

Σε αυτόν τον μεγάλο περιορισμό, που επιβάλλεται από τα προλεχθέντα στους φυσικούς νόμους, έγκειται το κομμάτι διαύγειας που είναι σύμφυτο με τη γενική σχετικότητα.

29ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Η λύση του προβλήματος της βαρύτητας σύμφωνα με την αρχή της γενικής σχετικότητας

Ο αναγνώστης που παρακολούθησε όλες τις παρατηρήσεις που εκτέθηκαν μέχρις εδώ δεν θα δυσκολευτεί καθόλου να κατανοήσει τη μέθοδο που δίνει τη λύση στο πρόβλημα της βαρύτητας.

Ξεκινούμε θεωρώντας ένα Γαλιλαιϊκό τομέα, δηλαδή ένα τομέα στο οποίο δεν υπάρχει βαρυτικό πεδίο αναφορικά με το σύστημα αναφοράς του Γαλιλαίου K. Γνωρίζουμε, σύμφωνα με την ειδική θεωρία της σχετικότητας, πώς συμπεριφέρονται οι κανόνες και τα ρολόγια ως προς το K κι ακόμα πώς συμπεριφέρονται τα απομακρυσμένα υλικά σημεία· τα τελευταία κινούνται με ευθύγραμμη και ομαλή κίνηση.

Στη συνέχεια αναγάγουμε αυτό το τμήμα σε ένα τυχαίο Γκαουσιανό σύστημα συντεταγμένων ή μάλλον σε ένα ελαστικό σύστημα, όπως το σύστημα αναφοράς K΄. Υπάρχει τότε βαρυτικό πεδίο G (ιδιαίτερου είδους) ως προς το K΄. Ένας απλός υπολογισμός επιτρέπει να ορίσουμε πώς συμπεριφέρονται, ως προς το K΄, οι κανόνες και τα ρολόγια καθώς και υλικά σημεία που κινούνται ελεύθερα. Ερμηνεύουμε λοιπόν αυτή τη συμπεριφορά ως συμπεριφορά κανόνων, ρολογιών και υλικών σημείων υπό την επίδραση του βαρυτικού πεδίου G. Εισάγουμε λοιπόν την υπόθεση ότι η δράση ενός βαρυτικού πεδίου στους κανόνες, τα ρολόγια και τα υλικά σημεία που κινούνται ελεύθερα διέπεται από τους ίδιους κανόνες, ακόμη κι όταν το βαρυτικό πεδίο δεν προκύπτει από την ιδιαίτερη περίπτωση του Γαλιλαίου, από έναν απλό μετασχηματισμό συντεταγμένων.

Αναζητούμε επομένως τη χωρο-χρονική συμπεριφορά, του βαρυτικού πεδίου G που προκύπτει από έναν απλό μετασχηματισμό των συντεταγμένων της ειδικής περίπτωσης του Γαλιλαίου, κι εκφράζουμε αυτή τη συμπεριφορά με έναν νόμο που ισχύει πάντοτε όποιο κι αν είναι το (ελαστικό) σύστημα αναφοράς που έχει επιλεγεί.

Καθώς το πεδίο G που μελετάται είναι ιδιαίτερου είδους, ο νόμος αυτός δεν είναι ακόμη ο γενικός κανόνας του βαρυτικού πεδίου. Για να τον βρούμε, πρέπει ακόμη να γενικεύσουμε τον νόμο που βρήκαμε προηγουμένως· η γενίκευση αυτή ορίζεται εξ ολοκλήρου λαμβάνοντας υπόψη τις ακόλουθες συνθήκες:

α. Η ζητούμενη γενίκευση πρέπει επίσης να πληροί το θεώρημα της γενικής σχετικότητας.

β. Εάν υπάρχει ύλη στο θεωρούμενο τμήμα, το πεδίο που δημιουργεί δεν εξαρτάται παρά από την αδρανειακή μάζα κι επομένως, σύμφωνα με το 15ο κεφάλαιο, από την ενέργειά της και μόνον.

γ. Το σύνολο του βαρυτικού πεδίου και της ύλης πρέπει να πληροί τον νόμο της διατήρησης της ενέργειας (ή της ορμής).

Τέλος, η αρχή της γενικής σχετικότητας μάς επιτρέπει αν βρούμε την επίδραση του βαρυτικού πεδίου στην εξέλιξη όλων των φαινομένων που διέπονται από γνωστούς νόμους στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει βαρυτικό πεδίο, δηλαδή που εντάσσονται ήδη στο πλαίσιο της θεωρίας της ειδικής σχετικότητας. Ενεργούμε έτσι κατ' αρχήν ακολουθώντας τη μέθοδο που αναλύθηκε ήδη για τους κανόνες, τα ρολόγια και τα κινητά υλικά σημεία.

Η θεωρία της βαρύτητας που συνάγεται έτσι από την αρχή της γενικής σχετικότητας δεν είναι αξιοσημείωτη αποκλειστικά για την ομορφιά της: διορθώνει το σφάλμα που παρουσιάζει η κλασική μηχανική που επισημάνθηκε στο 21ο κεφάλαιο, εξηγεί τον εμπειρικό νόμο της ισότητας των αδρανειακών και βαρυτικών μαζών κι επιπλέον έχει ήδη εξηγήσει δύο εμπειρικά γεγονότα της αστρονομίας μπροστά στα οποία η κλασική μηχανική είχε σταθεί ανήμπορη. Το μεν δεύτερο από αυτά, δηλαδή η καμπυλότητα των φωτεινών ακτινών εξαιτίας του ηλιακού βαρυτικού πεδίου έχει ήδη αναφερθεί· το μεν πρώτο αφορά την τροχιά του πλανήτη Ερμή.

Εάν παρατηρήσουμε τις εξισώσεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας στην ιδιαίτερη περίπτωση όπου τα βαρυτικά πεδία είναι αδύναμα κι όπου όλες οι μάζες μετατοπίζονται, ως προς το σύστημα αναφοράς, με μικρές ταχύτητες συγκριτικά με εκείνη του φωτός, παίρνουμε αρχικά τη νευτώνεια θεωρία ως μια πρώτη προσέγγιση· βρίσκουμε λοιπόν αυτή τη θεωρία χωρίς να κάνουμε κάποια ειδική υπόθεση, ενώ ο Νεύτωνας χρειάστηκε να εισαγάγει την υπόθεση μιας βαρυτικής δύναμης αντιστρόφως ανάλογης προς το τετράγωνο της απόστασης των δύο υλικών σημείων που επενεργούσαν μεταξύ τους. Με μεγαλύτερη ακρίβεια, φαίνονται ορισμένες αποκλίσεις από τη νευτώνεια θεωρία, αποκλίσεις που ακόμη διαφεύγουν ωστόσο σχεδόν όλες τους των παρατηρήσεών μας λόγω του μικρού τους μεγέθους.[22]

Θα εξετάσουμε ειδικά μία από αυτές τις αποκλίσεις. Σύμφωνα με τη νευτώνεια θεωρία, ένας πλανήτης πρέπει να διαγράφει γύρω από τον Ήλιο μία έλλειψη που θα διατηρούσε συνεχώς την ίδια θέση ως προς τους απλανείς αστέρες, εάν μπορούσαμε να αμελήσουμε τη δράση των άλλων πλανητών επί του προκείμενου πλανήτη, και την καθαυτή κίνηση των απλανών αστέρων. Εάν διορθώσουμε την παρατηρούμενη κίνηση των πλανητών λαμβάνοντας υπόψη μας τις δύο αυτές επιδράσεις, πρέπει να βρούμε ως τροχιά του πλανήτη μία έλλειψη σταθερή σε σχέση με τους απλανείς αστέρες, στην περίπτωση που η νευτώνεια θεωρία ευσταθεί. Η συνέπεια αυτή που παρατηρείται με πολύ μεγάλη ακρίβεια επαληθεύτηκε για όλους τους πλανήτες μέχρι τον κοντινότερο πλανήτη στον Ήλιο, τον Ερμή, με την ακρίβεια την οποία μπορούμε να επιτύχουμε σήμερα. Αναφορικά όμως με τον Ερμή γνωρίζουμε ήδη από την εποχή του Λε Βεριέ ότι η διορθωμένη έλλειψη που παριστά την τροχιά του, όπως είπαμε, δεν είναι ακίνητη ως προς τους απλανείς αστέρες αλλά μάλλον κινείται με μια εξαιρετικά αργή περιστροφική κίνηση στο επίπεδο της τροχιάς και κατά τη φορά της περιστροφικής κίνησης. Ως τιμή αυτής της περιστροφικής κίνησης της έλλειψης βρίσκουμε 43 δευτερόλεπτα τόξου ανά αιώνα με απόκλιση μικρότερη λίγων δευτερολέπτων. Η κλασική μηχανική δεν επιτρέπει την εξήγηση αυτού του φαινόμενου παρά διατυπώνοντας ελάχιστα αληθοφανείς υποθέσεις επινοημένες αποκλειστικά για αυτόν τον σκοπό.

Συνάγεται από τη γενική θεωρία της σχετικότητας ότι κάθε έλλειψη περιστρέφεται υποχρεωτικά γύρω από τον Ήλιο με τον τρόπο που προαναφέρθηκε, ότι –εκτός από τον Ερμή– αυτή η περιστροφή είναι πολύ ασθενής για όλους τους πλανήτες ώστε να ανιχνευτεί με την τωρινή ακρίβεια των μετρήσεών μας και, τέλος, ότι αγγίζει για τον Ερμή τα 43 δευτερόλεπτα τόξου ανά αιώνα, ακριβώς όπως εδραιώθηκε από την παρατήρηση.

Επιπλέον, μπορέσαμε ακόμα να συμπεράνουμε από την εν λόγω θεωρία μια συνέπεια επαληθεύσιμη από τις παρατηρήσεις, δηλαδή μια μετατόπιση του φάσματος του φωτός που εκπέμπεται έως εμάς από τους μεγάλους αστέρες συγκριτικά με εκείνη που δίνει στη Γη το φως που παράγεται με ανάλογο τρόπο (δηλαδή από το ίδιο μοριακό οικοδόμημα). Δεν αμφιβάλλω ότι αυτή η συνέπεια της θεωρίας θα επαληθευτεί επίσης στο άμεσο μέλλον.[23]

---

22. Γεγονός που δικαιολογεί τη σύγχρονη στάση των αστρονόμων και των φυσικών που επισημαίνουμε στο τέλος της εισαγωγής μας.
23. Αυτή η συνέπεια της σχετικότητας επαληθεύτηκε εξίσου στο φάσμα του Ήλιου, όπου η διολίσθηση δεν είναι ωστόσο παρά 0,011 άνγκστρομ (το άνγκστρομ είναι το δισεκατομμυριοστό του μέτρου).

Γ' ΚΟΙΝΟΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΤΗΡΙΞΗΣ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Η δημόσια δαπάνη του προγράμματος συγχρηματοδοτείται κατά 70%
από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ) και κατά 30%
από Εθνική συμμετοχή στο πλαίσιο του Μέτρου 4.4
Δράση 4.4.5 «Ανοιχτές Θύρες - 2ος Κύκλος» του Επιχειρησιακού Προγράμματος
«ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ» - Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης 2000 - 2006.

ISBN: 960-7998-34-0