Π. Ιωάννου & Θ. Αποστολάτος
9/10/2001

Διάλεξη 1η

Γαλιλαίος και Νεύτωνας: Τα πρώτα πνευματικά άλματα προς μια θεωρία φυσικής

Τα βασικά θεμέλια της κλασσικής μηχανικής τέθηκαν για πρώτη φορά στις αρχές του 17ου αιώνα από τον Γαλιλαίο και κατά τα τέλη του ιδίου αιώνα από τον Ισαάκ Νεύτωνα. Ειδικότερα, η παρουσίαση της μηχανικής από τον Νεύτωνα στο έργο του *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας*) αποτελεί την πρώτη συστηματική προσπάθεια διατύπωσης των θεμελιωδών φυσικών νόμων (με μόνη εξαίρεση τον Αρχιμήδη ο οποίος, 2000 χρόνια νωρίτερα, διατύπωσε τη θεωρία της στατικής και υδροστατικής), οι οποίοι διέπουν τις κινήσεις των σωμάτων. Το έργο του Νεύτωνα είναι για τη φυσική ότι ήταν για τα μαθηματικά τα *Στοιχεία* του Ευκλείδη. Η μηχανική του Νεύτωνα και ο νόμος της παγκόσμιας βαρύτητας, που διατυπώθηκε συγχρόνως από τον ίδιο, έδωσαν μια θεμελιακή εξήγηση της κίνησης των ουρανίων σωμάτων. Ο Νεύτωνας διατυπώνοντας τους νόμους της μηχανικής εγκαινιάζει συγχρόνως ένα νέο τομέα μαθηματικών που ονομάσθηκε από τον ίδιο λογισμός των ροών (fluxion), ενώ σήμερα είναι ευρύτερα γνωστός ως διαφορικός και απειροστικός λογισμός. Με αυτό τον τρόπο οικοδομείται από τον Γαλιλαίο και τον Νεύτωνα το πρώτο παράδειγμα φυσικής θεωρίας όπου τα μαθηματικά χρησιμοποιούνται συστηματικά για τον προσδιορισμό των φυσικών επιπτώσεων των θεμελιωδών νόμων. Η πνευματική αυτή πορεία του Γαλιλαίου και του Νεύτωνα αποτέλεσε πρότυπο για τη θεμελίωση, αργότερα, του οικοδομήματος της σύγχρονης θεωρητικής φυσικής.

Μέχρι την εποχή του Γαλιλαίου κυριαρχούσε η φυσική του Αριστοτέλη. Ο Αριστοτέλης (-384/-322) επιχείρησε για πρώτη φορά να διατυπώσει αρχές δυναμικής, οι οποίες ισχυρίζονταν ότι για να κινείται ένα σώμα με σταθερή ταχύτητα v, θα πρέπει να ασκείται συνεχώς επάνω του σταθερή δύναμη F:

$$F = kv \tag{1.1}$$

Η αντίληψη αυτή, η οποία ήταν συμβατή με την καθημερινή εμπειρία, επέφερε αλλαγές στον τρόπο θεώρησης του κόσμου. Η φυσική κατάσταση των σωμάτων, όταν σε αυτά δεν ασκείται δύναμη, είναι η κατάσταση ακινησίας και συνεπώς ο χώρος είναι απόλυτος και «εντός του απολύτου χώρου έκαστον ελεύθερον υλικόν σημείον παραμένει ακίνητον εις μία θέσιν». Η εξέχουσα αυθεντία του Αριστοτέλη στιγμάτισε την κρατούσα κοσμολογία του Μεσαίωνα, που τέθηκε σε ουσιαστική αμφισβήτηση από τον Γαλιλαίο (1564/1642), ο οποίος συγκρούστηκε με την κρατούσα αντίληψη. Ο Γαλιλαίος οικοδόμησε την αντιαριστοτελική κριτική στο έξοχο βιβλίο του «*Διάλογοι περί των δύο κύριων κοσμοθεωριών: του Πτολεμαίου και του Κοπέρνικου*»[1] βασισμένος σε απλά καθημερινά πειράματα που πραγματοποί-

[1] Το βιβλίο είναι γραμμένο στην κοινή Ιταλική αντί στη συνήθη Λατινική που ήταν η γλώσσα της επιστημονικής επικοινωνίας. Ο Γαλιλαίος επέλεξε την κοινή Ιταλική, για να έχει το βιβλίο του μεγαλύτερη απήχηση. Το βιβλίο πρωτοεκδόθηκε το 1632, είχε τεράστια εκδοτική επιτυχία και όταν

ησε με κεκλιμένα επίπεδα, από τα οποία προσπάθησε να αφαιρέσει την τριβή λειαίνοντας επιμελώς τις επιφάνειες. Για την ακρίβεια, ο Γαλιλαίος παρατηρώντας ότι τα σώματα που ολισθαίνουν προς τα κάτω σε ένα κεκλιμένο επίπεδο και στη συνέχεια ανέρχονται σε ένα άλλο κεκλιμένο επίπεδο, φθάνουν σε ύψος ίδιο με αυτό στο οποίο βρίσκονταν αρχικά, συμπέρανε ότι, αν το δεύτερο επίπεδο γίνει οριζόντιο, καταργώντας έτσι οποιαδήποτε δύναμη ασκείται στο σώμα κατά την ολίσθησή του σε αυτό, το σώμα θα συνεχίσει να κινείται επ' άπειρο. Ουσιαστικά η παρατήρηση αυτή του Γαλιλαίου είναι ισοδύναμη με τον πρώτο νόμο του Νεύτωνα (που θα εξετάσουμε παρακάτω), ότι δηλαδή η φυσική κατάσταση ενός ελεύθερου σώματος είναι η κίνηση και όχι η ακινησία. Ο Γαλιλαίος προχώρησε ακόμη περισσότερο, μελετώντας την κίνηση των σωμάτων που ολισθαίνουν σε κεκλιμένα επίπεδα και διατυπώνοντας το νόμο της ομαλά επιταχυνόμενης κίνησης. Ως χρονόμετρο χρησιμοποίησε το βάρος του νερού που έτρεχε από μια δεξαμενή μέσα σε ένα δοχείο καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης που μελετούσε.

Ο Γαλιλαίος ήταν ο πρώτος που έφτασε στην επαναστατική διαπίστωση ότι οι φυσικοί νόμοι είναι αναλλοίωτοι όταν ιδωθούν από διαφορετικά συστήματα αναφοράς τα οποία κινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο με σταθερή σχετική ταχύτητα. Η ανακάλυψη αυτής της νέας συμμετρίας, όπως θα δούμε, αρκεί (για να είμαστε ακριβέστεροι, σχεδόν αρκεί) για να παράγει κανείς τους γνωστούς νευτώνειους νόμους και υπό αυτή την έννοια μπορεί να υποστηριχθεί ότι η σημαντικότερη ανακάλυψη ήταν η διαπίστωση αυτής της συμμετρίας, η οποία σήμερα ονομάζεται Γαλιλαϊκή συμμετρία. Ο Γαλιλαίος ήταν αυτός ο οποίος θεώρησε τη δύναμη ως μηχανικό αίτιο και συνειδητοποίησε ότι το πρόβλημα της κίνησης των ουρανίων σωμάτων είναι ένα μηχανικό πρόβλημα που δεν διαφέρει σε τίποτε από τα προβλήματα με τα κεκλιμένα επίπεδα που μελετούσε στο εργαστήριό του. Παρ' ότι η ακριβής σχέση μεταξύ δύναμης και κίνησης διατυπώνεται τελικά από τον Νεύτωνα, σε ολόκληρη την εργασία του ο Γαλιλαίος φαίνεται να συνειδητοποιεί την ύπαρξη μιας τέτοιας σχέσης. Η σημαντική πρόοδος που επιτεύχθηκε από τον Γαλιλαίο οφείλεται επίσης στην επαναστατική καινοτομία του να εφαρμόζει τη μαθηματική θεωρία στα φυσικά προβλήματα. Η απόδειξη του Γαλιλαίου, ότι η κίνηση ενός σώματος στο πεδίο βαρύτητας ακολουθεί τη μαθηματικά τέλεια τροχιά που περιγράφεται από μια παραβολή, αποτελεί ένα μόνο δείγμα της αλλαγής η οποία έμελλε να συμβεί στο χώρο της φυσικής θεωρίας. Δεν είναι τυχαίο ίσως ότι αυτή την επαναστατική άποψη κλήθηκε ουσιαστικά ο Γαλιλαίος από την Ιερά εξέταση να απαρνηθεί για να αποφύγει την καταδίκη. Διότι τη στιγμή που ο Γαλιλαίος ανακοινώνει ότι

> «*Πιθανώς να νομίζει κανείς ότι η φιλοσοφία είναι ένα βιβλίο μυθιστοριογραφίας, όπως για παράδειγμα η Ιλιάδα, ή ο Μαινόμενος Ολλανδός, έργα στα οποία το ζήτημα αν όσα έχουν γραφεί είναι αληθινά*

απαγορεύτηκε η κυκλοφορία του, 5 μόλις μήνες από την έκδοσή του, δεν είχε μείνει ούτε ένα αντίτυπο απούλητο. Το βιβλίο μεταφράζεται στα αγγλικά το 1661 και διαβάζεται από το Νεύτωνα. Δεν γνωρίζουμε άν έχει μεταφραστεί μέχρι σήμερα στα Ελληνικά. Γνωρίζουμε ότι το έργο του Νεύτωνα Principia δεν έχουν μεταφρασθεί στα Ελληνικά. Αν γνωρίζει κανείς αν υπήρξε ποτέ Ελληνική έκδοση του βιβλίου του Γαλιλαίου «*Διάλογοι περί των δύο κύριων κοσμοθεωριών: του Πτολεμαίου και του Κοπέρνικου*» θα εκτιμούσαμε να μας πληροφορήσει περί τούτου. Πάντως είναι ένα βιβλίο το οποίο διαβάζεται ευχάριστα ακόμη και σήμερα και συνιστούμε στον αναγνώστη να το διαβάσει. Ίσως κάποιος από σας να θελήσει να το μεταφράσει στα ελληνικά.

είναι το λιγότερο σημαντικό απ' όλα. Όλη η φιλοσοφία είναι γραμμένη στο μεγάλο βιβλίο του Σύμπαντος, το οποίο είναι πάντοτε ανοικτό στο βλέμμα μας. Όμως το βιβλίο αυτό δεν μπορεί να γίνει κατανοητό, αν δεν μάθουμε πρώτα τη γλώσσα στην οποία είναι γραμμένο και δεν διδαχθούμε την αλφάβητο στην οποία είναι γραμμένο. Και το βιβλίο αυτό είναι γραμμένο στη γλώσσα των μαθηματικών και οι χαρακτήρες του είναι τρίγωνα, κύκλοι και άλλα γεωμετρικά σχήματα, που χωρίς αυτά είναι ανθρωπίνως αδύνατο να κατανοηθεί έστω και μία λέξη· χωρίς τη γνώση αυτή περιπλανιόμαστε σε ένα σκοτεινό λαβύρινθο»[2]

αρχίζουν ήδη να τρίζουν τα θεμέλια της παλαιάς τάξης πραγμάτων[3]. Ο μαθηματικός ρεαλισμός του Γαλιλαίου τον οδηγεί στη διαπίστωση ότι μόνο αντικειμενικές ποσότητες, όπως για παράδειγμα η συμμετρία, ο αριθμός, το σχήμα, το μέγεθος, η θέση, η κίνηση, αρκούν για τη περιγραφή του φυσικού κόσμου. Η φύση είναι κάτι πέρα από τον άνθρωπο που τη μελετά, αποκτά ανεξάρτητη υπόσταση και είναι έτοιμη να μελετηθεί αυστηρά με τη γλώσσα των μαθηματικών. Τελικά, η προσπάθεια του Γαλιλαίου ολοκληρώνεται για πρώτη φορά από τον Νεύτωνα.

Εν τω μεταξύ, ο Δανός αστρονόμος Tycho Brahe (1546/1601) ο οποίος σχεδίασε και κατασκεύασε αστεροσκοπεία, αρχικά στην Κοπεγχάγη και αργότερα στην Πράγα, συνέταξε αστρονομικούς πίνακες στους οποίους καθορίζονταν με μεγάλη ακρίβεια οι θέσεις των πλανητών. Το έργο του συνεχίστηκε από τον Γερμανό μαθητή του και εξαίρετο μαθηματικό Johannes Kepler (1571/1630). Ο Kepler, επιτυγχάνοντας παρατηρήσεις ακόμη μεγαλύτερης ακρίβειας από το δάσκαλό του κατέληξε στους παρακάτω νόμους που περιγράφουν την κίνηση των πλανητών:

(α) οι πλανήτες κινούνται σε ελλείψεις, τη μία εστία των οποίων κατέχει ο Ήλιος,
(β) σε ίσους χρόνους η επιβατική ακτίνα που συνδέει τον Ήλιο με τον κάθε πλανήτη σαρώνει ίσα εμβαδά,
(γ) το τετράγωνο της περιόδου των πλανητών είναι ανάλογο με τον κύβο του μεγάλου ημιάξονα της ελλειπτικής τους τροχιάς, με σταθερά αναλογίας ίδια για όλους τους πλανήτες.

Ο Kepler δημοσίευσε το 1609 τους δύο πρώτους νόμους του στο βιβλίο του «*Nova Astronomia*» (*Νέα Αστρονομία*), ενώ χρειάστηκε δέκα ακόμη ολόκληρα χρόνια για να διατυπώσει με βάση τις παρατηρήσεις του τον 3ο νόμο του, τον οποίο παρουσίασε στο νέο του βιβλίο «*Harmonices mundi*» (*Κοσμικές Αρμονίες*).

Ο Νεύτωνας (1642/1727) γεννήθηκε τη χρονιά που πέθανε ο Γαλιλαίος και έζησε στα χρόνια της σαρωτικής πανούκλας, η οποία αποδεκάτισε το μισό

[2] *Galileo: The Assayer* (μετάφραση του S. Drake).
[3] Η διάσταση μεταξύ της Εκκλησίας και του Γαλιλαίου είναι ένα περίπλοκο ζήτημα· δεν πρόκειται για την τετριμμένη αντίθεση μεταξύ του καλού και του κακού, όπως έχει αποδοθεί (ίσως για άλλους λόγους) από ορισμένους «επαναστατικούς» συγγραφείς. Αποδεικνύει την εύλογη αδυναμία των ανθρώπων να αποδεχθούν μια πραγματικά επαναστατική αλλαγή. Αξίζει να διαβάσετε κάποια ουσιαστική εκκλησιαστική απολογητική επί του θέματος, όπως λ.χ. το βιβλίο του Langford "*Galileo, Science and the Church*", The University of Michigan Press, 1992.

πληθυσμό της Ευρώπης. Σπούδασε στο Πανεπιστήμιο του Καίμπριτζ μελετώντας, εκτός των μαθηματικών και των φυσικών επιστημών και θεολογία και φιλοσοφία, όπως όριζε η παράδοση. Παρόλο που ο Νεύτωνας, σε ηλικία μόλις 22 περίπου ετών, είχε καταλήξει σε εξαιρετικά συμπεράσματα σχετικά με τη δύναμη της παγκόσμιας έλξης και είχε επινοήσει τον απειροστικό λογισμό, εντούτοις, απέφυγε να δημοσιεύσει τις εργασίες αυτές. Σε ηλικία 27 ετών έγινε καθηγητής στο Πανεπιστήμιο του Καίμπριτζ, καταλαμβάνοντας τη Λουκασιανή έδρα των Μαθηματικών, μια θέση την οποία σήμερα κατέχει ο παγκοσμίου φήμης βρεττανός φυσικός, Stephen Hawking. Ο Νεύτωνας γνώριζε τα έργα του Kepler και προσπάθησε να συσχετίσει την κίνηση των ουρανίων σωμάτων με την ελεύθερη πτώση των σωμάτων πάνω στη Γη. Η εργασία του περί παγκόσμιας έλξης έγινε γνωστή πολύ αργότερα, ύστερα από μια σχετική ερώτηση που του έθεσε ο Edmond Halley. Την εποχή εκείνη οι βρεττανοί φυσικοί επιστήμονες, όπως ο Wren, ο Halley και ο Hooke, αναρωτιόντουσαν αν μια δύναμη αντιστρόφου τετραγώνου ($F \propto 1/r^2$) μπορούσε να οδηγεί στους νόμους του Kepler σχετικά με την κίνηση των πλανητών. Είχαν κατανοήσει ότι στην περίπτωση κυκλικών κινήσεων, η δύναμη θα έπρεπε να είναι δύναμη αντιστρόφου τετραγώνου. [Αποδείξτε το.] Η απόδειξη του Νεύτωνα, ότι μια δύναμη αντιστρόφου τετραγώνου οδηγεί σε ελλειπτικές τροχιές -σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του Kepler- παρουσιάστηκε το 1684 υπό μορφή πραγματείας με τίτλο «*De motu corporum in gyrum*» (*Περί της κινήσεως των σωμάτων σε τροχιά*) στη Βασιλική Ακαδημία του Λονδίνου. Το 1687 ο Νεύτωνας δημοσίευσε το μεγαλειώδες έργο του «*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*», στο οποίο διατυπώνονται οι 3 περίφημοι νόμοι της δυναμικής:

ΠΡΩΤΟΣ ΝΟΜΟΣ: Κάθε σώμα παραμένει στην κατάσταση ηρεμίας ή ομαλής κίνησης στην οποία βρισκόταν αρχικά, εκτός εάν αναγκαστεί να μεταβάλει την κατάσταση αυτή εξαιτίας των δυνάμεων που ασκούνται πάνω του.

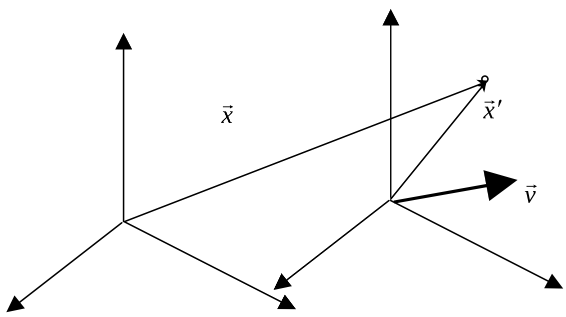
ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΝΟΜΟΣ: Η μεταβολή της κίνησης (κάτι που ο Νεύτων είχε καθορίσει πρωτύτερα ως την ποσότητα της ύλης επί την ταχύτητα, αυτό δηλαδή που σήμερα αποκαλούμε ορμή) είναι ανάλογη της ασκούμενης δύναμης και συντελείται στη διεύθυνση της ευθείας κατά την οποία εφαρμόζεται αυτή η δύναμη.

ΤΡΙΤΟΣ ΝΟΜΟΣ: Σε κάθε δράση αντιτίθεται πάντα μια ίση αντίδραση, ή με άλλα λόγια, οι αμοιβαίες δράσεις που ασκούν δύο σώματα, το ένα στο άλλο, είναι πάντα ίσες και αντίθετες.

Ο Νεύτωνας χρησιμοποίησε τους 3 αυτούς νόμους, μαζί με ένα σύνολο ορισμών, για να επιλύσει προβλήματα κίνησης μηχανικών συστημάτων υπό την επενέργεια συγκεκριμένων δυνάμεων. Η δομή του βιβλίου του, ακολουθώντας μια σειρά προτάσεων και πορισμάτων, θυμίζει τα «*Στοιχεία*» του Ευκλείδη. Είναι μάλιστα εντυπωσιακό ότι όλες οι αποδείξεις που παρουσιάζονται στο βιβλίο του Νεύτωνα είναι καθαρά γεωμετρικές, χωρίς να χρησιμοποιούνται σε αυτές καθόλου στοιχεία Ανάλυσης, σε αντίθεση με τον τρόπο που παρουσιάζονται οι ίδιες αυτές αποδείξεις σε σύγχρονα βιβλία.

Σχόλια σχετικά με τους 3 νόμους του Νεύτωνα

- Σε πρώτη ανάγνωση, ο πρώτος νόμος φαίνεται να πηγάζει από τον δεύτερο. Πράγματι, αρκεί να μηδενίσει κανείς τη δύναμη και αμέσως προκύπτει από το 2ο νόμο ότι η ταχύτητα του σώματος θα παραμείνει η ίδια. Όμως, πώς είναι δυνατό να μετρήσουμε την κίνηση ενός σώματος, αν δεν διαθέτουμε εξ αρχής κάποιο σύστημα αναφοράς με βάση το οποίο θα παρακολουθήσουμε και θα περιγράψουμε την κίνηση του σώματος; Ο 1ος λοιπόν νόμος είναι αυτός που καθορίζει το είδος των συστημάτων αναφοράς, τα οποία είναι κατάλληλα για να περιγράψουν σωστά (σύμφωνα με το δεύτερο νόμο) την κίνηση των σωμάτων υπό την επίδραση δεδομένων δυνάμεων. Τα συστήματα αυτά, ως προς τα οποία τα ελεύθερα σωματίδια κινούνται ευθύγραμμα και ομαλά, ονομάζονται *αδρανειακά συστήματα*. Αφού οι βαρυτικές δυνάμεις έχουν άπειρη εμβέλεια και η ύλη δεν έχει τρόπο να θωρακιστεί από αυτές, είναι αδύνατο θεωρητικά να κατασκευάσουμε ελεύθερα σωματίδια και μαζί με αυτά και αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Μπορούμε, όμως, με αρκετά καλή προσέγγιση να θεωρήσουμε ως αδρανειακό σύστημα ένα σύστημα το οποίο είναι ακίνητο σε σχέση με τους μακρινούς απλανείς αστέρες, όπως και κάθε άλλο σύστημα, το οποίο κινείται ευθύγραμμα και με σταθερή ταχύτητα σε σχέση με το πρώτο. Στο γιατί τα συστήματα αυτά είναι κατά μεγάλη προσέγγιση αδρανειακά, μπορεί κανείς να απαντήσει με το ακόλουθο επιχείρημα: θεωρώντας ότι όλες οι αλληλεπιδράσεις εξασθενούν με την απόσταση, ένα σωματίδιο που βρίσκεται μακριά από κάθε ουράνιο σώμα, είναι σχεδόν ελεύθερο και κατά συνέπεια αναμένεται να κινείται ευθύγραμμα και ομαλά σε σχέση με τα ουράνια σώματα. Το σύστημα λοιπόν των απλανών αστέρων είναι περίπου αδρανειακό. Σύμφωνα με ένα δεύτερο σύστημα (βλ. σχήμα), το οποίο κινείται με σταθερή ταχύτητα $\vec{v}$ σε σχέση με το πρώτο, το σωματίδιο βρίσκεται στη θέση $\vec{x}\,'$ που διαφέρει από τη θέση $\vec{x}$ του σωματιδίου, σύμφωνα με το πρώτο σύστημα, κατά

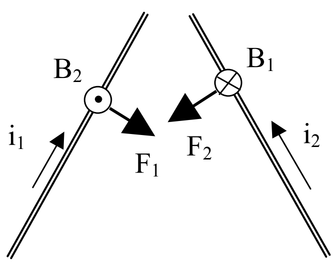


$$\vec{x} - \vec{x}\,' = \vec{R} + \vec{v}t\,, \tag{1.2}$$

όπου $\vec{R}$ η αρχική (για t=0) απόσταση των δύο συστημάτων. Αν το σωματίδιο φαίνεται να κινείται ευθύγραμμα και ομαλά σε σχέση με το πρώτο σύστημα ($\dot{\vec{x}} = \sigma\tau\alpha\theta$), είναι εύκολο να διαπιστώσετε ότι κινείται ευθύγραμμα και ομαλά και σε σχέση με το δεύτερο σύστημα ($\dot{\vec{x}}\,' = \dot{\vec{x}} - \vec{v} = \sigma\tau\alpha\theta$). Επομένως και το δεύτερο σύστημα είναι αδρανειακό. Ο μετασχηματισμός αυτός που μας μετέφερε από το ένα αδρανειακό σύστημα στο άλλο ονομάζεται γαλιλαϊκός μετασχηματισμός (περισσότερα σχετικά με τον μετασχηματισμό αυτό και τη συμμετρία που κρύβεται πίσω από αυτόν θα δούμε στην 3η διάλεξη).
- Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα δεν είναι δυνατό να εκληφθεί ως ορισμός της δύναμης. Αν ήταν τέτοιος δεν θα είχε καμία αξία ως δυναμικός νόμος για τον

καθορισμό τής κίνησης των σωμάτων. Προκειμένου να έχει πρακτική σημασία θα πρέπει η δύναμη να δίνεται ανεξάρτητα. Ο Νεύτωνας αναγνωρίζοντας το γεγονός αυτό, καθόρισε στο έργο του «*Principia*» τη βαρυτική δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ των σημειακών μαζών, προκειμένου να προσδιορίσει την κίνηση που προκαλεί αυτή η δύναμη στις εν λόγω μάζες.

- Ο τρίτος νόμος μοιάζει εκ πρώτης όψεως με μια παρατήρηση, η οποία δεν φαίνεται να έχει ουσιαστική αξία για τον καθορισμό της κίνησης των μηχανικών συστημάτων, εφόσον οι δύο αντίθετες δυνάμεις δρούν σε διαφορετικά σώματα. Ο Νεύτωνας όμως αντιλήφθηκε την τεράστια σημασία που είχε η εισαγωγή ενός τέτοιου νόμου προκειμένου να επεκτείνει την εφαρμογή του δυναμικού νόμου (του 2ου νόμου του) από σωματίδια μηδενικών διαστάσεων, στα οποία αναφέρονται ρητά οι νόμοι του, σε εκτεταμένα υλικά στερεά σώματα. Με την εμφάνιση ίσων και αντιθέτων δυνάμεων καταργείται οποιαδήποτε δύναμη θα μπορούσαμε ενδεχομένως να αποδώσουμε σε ένα σώμα εξαιτίας του εαυτού του, επειδή αυτό απαρτίζεται από πλήθος αλληλεπιδρώντων σωματιδίων. Έτσι δεν χρειάζεται να λάβουμε υπόψη καμία *ιδιοδύναμη* όταν θέλουμε να μελετήσουμε την κίνηση ενός στερεού (όπως για παράδειγμα της Γης), παρά μόνο όλες τις δυνάμεις που επενεργούν στο υπό μελέτη σώμα από τα άλλα γειτονικά του σώματα. Η διατύπωση του 3ου νόμου έδωσε τη δυνατότητα στο Νεύτωνα να αποφύγει να αναφερθεί σε ορισμένο τύπο σωμάτων, όσον αφορά την εφαρμογή των άλλων δύο νόμων. Σήμερα γνωρίζουμε καλά την σπουδαιότητα αυτού του φαινομενικά διαφορετικού νόμου. Πίσω από το νόμο αυτό της συμμετρίας των δυνάμεων αλληλεπίδρασης που ασκούνται μεταξύ των μερών ενός φυσικού συστήματος κρύβεται, όπως θα δούμε εκτενέστερα σε επερχόμενο κεφάλαιο, η διατήρηση της ορμής ενός απομονωμένου συστήματος -κάτι ανάλογο δηλαδή με τη διατήρηση της ταχύτητας ενός ελεύθερου σωματιδίου-, οσοδήποτε μεγάλο και αν είναι αυτό, π.χ. ένας ολόκληρος γαλαξίας. Αν και ο 3ος νόμος του Νεύτωνα δεν ισχύει αυτολεξεί για όλα τα φυσικά συστήματα παρά μόνο για τα μηχανικά συστήματα, εντούτοις υπό την ευρύτερη έννοια της διατήρησης της ορμής ο νόμος έχει καθολική εφαρμογή. Φανταστείτε για παράδειγμα δύο ευθύγραμμους ρευματοφόρους αγωγούς, οι οποίοι δεν είναι παράλληλοι. Είναι εύκολο να διαπιστώσετε ότι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους δεν είναι αντιπαράλληλες (βλ. σχήμα). Η φαινομενική αντίφαση εδώ οφείλεται στη μη αναφορά της ορμής που εμπεριέχεται στο μαγνητικό πεδίο, αφού αποτελεί και αυτό μια φυσική οντότητα.



- Ο 2ος νόμος του Νεύτωνα, όπως προείπαμε, αναφέρεται μόνο σε αδρανειακούς παρατηρητές, δηλαδή σε μετρητές της κίνησης των σωμάτων βάσει αδρανειακών συστημάτων αναφοράς. Οποιοδήποτε απόπειρα εφαρμογής αυτού του νόμου από μη αδρανειακούς παρατηρητές μπορεί να προκαλέσει σύγχυση. Παρά ταύτα, κυρίως επειδή η εξέδρα όλων των γήινων πειραμάτων αλλά και της μελέτης των φαινομένων που συμβαίνουν πάνω σε αυτή, τυγχάνει να είναι περιστρεφόμενη και επομένως μη αδρανειακή, συνηθίζουμε να τη χρησιμοποιούμε ως σύστημα αναφοράς. Φροντίζουμε, όμως, όταν κάτι τέτοιο πρόκειται να επιφέρει σημαντικές διορθώσεις, να επινοούμε τεχνητές δυνάμεις ή ψευδοδυνάμεις (όπως για παράδειγμα η φυγόκεντρος δύναμη) που μοναδικό στόχο έχουν να κάνουν το μη αδρανειακό σύστημα να «λειτουργεί» ως αδρανειακό, ώστε να μπορεί τελικά κανείς να χρησιμοποιεί το δυναμικό νόμο του Νεύτωνα για τη διερεύνηση της κίνησης των σωμάτων σε μη αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Για παράδειγμα, αν το τονούμενο σύστημα που συναντήσαμε παραπάνω κινείται με σταθερή επιτάχυνση $\vec{a}$ ως προς το άτονο αδρανειακό σύστημα, δηλαδή $\vec{x}' = \vec{x} - \frac{1}{2}\vec{a}t^2$, θα έχουμε ότι

$$m\frac{d^2\vec{x}'}{dt^2} = m\frac{d^2\vec{x}}{dt^2} - m\vec{a} = \vec{F} - m\vec{a}\,. \tag{1.3}$$

Ο 2ος νόμος του Νεύτωνα παίρνει τη γνώριμη μορφή του, με την πρόσθεση μιας νέας ψευδοδύναμης, της $-m\vec{a}$. Η χαρακτηριστική μάλιστα γραμμική εξάρτηση όλων των μη αδρανειακών δυνάμεων από τη μάζα του σώματος, γεννά υποψίες για το κατά πόσο η βαρύτητα είναι και αυτή μια τέτοιου είδους δύναμη.

- Η διατύπωση του 2ου νόμου του Νεύτωνα, υπαγορεύει μια διανυσματική σχέση. Από τη στιγμή που η αλλαγή της ποσότητας κίνησης ενός σωματιδίου συμβαίνει στη διεύθυνση που ασκείται η δύναμη, δεν μπορεί παρά και η δύναμη να είναι διάνυσμα. Περισσότερα για το τι είναι ένα διάνυσμα θα δούμε αργότερα. Προς το παρόν θα πρέπει να προσθέσουμε κάτι το οποίο δεν απορρέει άμεσα από τους νόμους του Νεύτωνα και το οποίο ο Νεύτωνας φροντίζει να διευκρινίσει. Όταν σε ένα σωματίδιο ασκούνται δύο οι περισσότερες δυνάμεις, μπορούμε να μελετήσουμε ανεξάρτητα τις αλλαγές στην κίνηση του σωματιδίου που θα προκαλούσε καθεμία από αυτές τις δυνάμεις από μόνη της και στη συνέχεια να υπολογίσουμε το διανυσματικό άθροισμα όλων αυτών των αλλαγών. Με άλλα λόγια ο τρόπος που «προσθέτουμε» τις δυνάμεις είναι ο ίδιος με τον τρόπο που προσθέτουμε τα διανύσματα θέσης: ακολουθώντας τη μέθοδο του παραλληλογράμμου.
- Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα εισάγει μια σταθερά που εξαρτάται από το σώμα και η οποία καθορίζει πόσο πολύ θα αλλάξει η κίνηση του σώματος δεδομένων των ασκούμενων δυνάμεων. Μετράει δηλαδή την «απροθυμία» μεταβολής της κίνησης του σώματος –αυτό δηλαδή που έχουμε μάθει να ονομάζουμε *αδράνεια.* Ο Νεύτωνας διαπίστωσε ότι η σταθερά αυτή σχετίζεται με την ποσότητα ύλης του σώματος, πρόκειται δηλαδή γι’ αυτό που αποκαλούμε *μάζα* του σώματος. Η έννοια της μάζας ενός σώματος, την οποία πρώτος ο Νεύτωνας χρησιμοποίησε με την παραπάνω σημασία, αποτελεί μια από τις λαμπρότερες συνεισφορές του στην Επιστήμη. Αν και καταρχήν θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε το δεύτερο νόμο για τον καθορισμό της μάζας ενός σώματος (γνώση της δύναμης και μέτρηση της επιτάχυνσης οδηγεί στον καθορισμό της μάζας), πρακτικά κάτι τέτοιο θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί –εξάλλου ποιος μας διαβεβαιώνει ότι η εκάστοτε ασκούμενη δύναμη σε ένα σώμα δεν εξαρτάται και αυτή από τη μάζα του σώματος, όπως για παράδειγμα η βαρυτική δύναμη; Ο τρίτος όμως νόμος σε συνδυασμό με το δεύτερο θα μας έλυναν τα χέρια όσον αφορά στον προσδιορισμό της μάζας των σωμάτων. Αν αφήσουμε δύο σώματα να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους

(συνδέοντάς τα π.χ. με ένα ελατήριο) και έχοντας απομονώσει αυτά από οποιαδήποτε άλλη δύναμη, αυτά θα κινηθούν σε αντίθετες κατευθύνσεις σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} F_{12} &= m_1 \ddot{x}_1 \\ F_{21} &= m_2 \ddot{x}_2 \end{aligned} \tag{1.4}$$

όπου F_{ij} είναι η δύναμη που ασκείται από το j-σώμα στο i-σώμα (για ευκολία θεωρήσαμε ότι οι κινήσεις και οι δυνάμεις συμβαίνουν πάνω σε μια ευθεία). Λόγω του ότι $F_{12} = -F_{21}$, θα πρέπει

$$\frac{\ddot{x}_1}{\ddot{x}_2} = -\frac{m_2}{m_1}. \tag{1.5}$$

Αν επιπλέον έχουμε φροντίσει τα σώματα να ξεκινήσουν από κάποια αρχικά σημεία, με αρχική ταχύτητα μηδέν, ο λόγος των μετατοπίσεων από τις αρχικές τους θέσεις θα είναι αντιστρόφως ανάλογος του λόγου των μαζών τους:

$$\frac{|\Delta x_1|}{|\Delta x_2|} = \frac{m_2}{m_1}. \tag{1.6}$$

Θεωρώντας λοιπόν τη μάζα του ενός σώματος ως πρότυπη μάζα ίση με 1, μπορούμε να καθορίσουμε τη μάζα οιουδήποτε άλλου σώματος, και μάλιστα χωρίς να ασχοληθούμε με το ποια είναι η δύναμη αλληλεπίδρασης! Μπορούμε ακόμη και να αλλάζουμε τη δύναμη αυθαίρετα από πείραμα σε πείραμα (αλλάζοντας π.χ. το ελατήριο) χωρίς να αλλοιώνουμε την ακρίβεια καθορισμού της μάζας οιουδήποτε σώματος.