

Οι έννοιες της «δύναμης» κατά τον 17ο και τον 18ο αιώνα *

Νίκος Κανδεράκης

Κέντρο Εκπαιδευτικής Έρευνας (ΚΕΕ) nikander@kee.gr

Περίληψη: Τον 17^ο αιώνα εμφανίζονται στη Φυσική Φιλοσοφία τρία νέα είδη «δυνάμεων» (υπάρχουν ήδη οι δυνάμεις της Στατικής). Ο Descartes εισάγει την «ποσότητα κίνησης» (mv) ως μέτρο της (εσωτερικής) «δύναμης» των κινούμενων σωμάτων. Ο Leibniz προτείνει τη «ζωντανή δύναμη» (mv^2) ως μέτρο της «δύναμης» αυτής. Τέλος, ο Νεύτων, μετά από μακροχρόνια και βασανιστική πορεία, διαμορφώνει τη νευτώνεια (σημερινή) δύναμη που είναι εξωτερική στο σώμα που την υφίσταται, μεταβάλλει την κίνηση και έχει ένα διπλό – συστημικό χαρακτήρα (δράση – αντίδραση). Τα είδη αυτά θα διατηρηθούν και σε όλο τον 18^ο αιώνα, ενώ θα διαχωριστούν σε διαφορετικά φυσικά μεγέθη γύρω στα μέσα του 19^{ου} αιώνα με τη δημιουργία των ενεργειακών εννοιών.

Εισαγωγή

Τον 17^ο αιώνα εξετάζονται στη Φυσική Φιλοσοφία τέσσερα κύρια είδη «δυνάμεων»: οι δυνάμεις της Στατικής (οι οποίες υπάρχουν ήδη από την αρχαιότητα και σχετίζονται με τις αριστοτελικές δυνάμεις), οι καρτεσιανές «δυνάμεις» των κινούμενων σωμάτων, δηλαδή οι «ποσότητες κίνησης», οι λαϊβνίτειες «δυνάμεις», δηλαδή οι «ζωντανές δυνάμεις» (*vis viva*), και οι νευτώνειες δυνάμεις, που είναι αντίστοιχες με τις σημερινές δυνάμεις. Τα είδη αυτά θα διατηρηθούν λίγο- πολύ και σε όλο τον 18ο αιώνα, αν και η δύναμη της Στατικής και η νευτώνεια δύναμη θα θεωρηθούν από κάποια στιγμή και ύστερα ότι αποτελούν ουσιαστικά το ίδιο είδος δύναμης. Η εννοιολογική αυτή σύγχυση θα ξεκαθαρίσει εν τέλει μόνο από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, ύστερα από την εισαγωγή των εννοιών που σχετίζονται ή αφορούν την ενέργεια. Στην εργασία αυτή θα εξετασθούν τα τέσσερα είδη «δυνάμεων» που αναφέρθηκαν καθώς και η πορεία τους στον 18^ο αιώνα, ενώ το κείμενο θα κλείσει με κάποιες διδακτικές επισημάνσεις σχετικά με τη δύναμη. Ενδιάμεσα θα παρουσιασθεί συνοπτικά η ιστορική εξέλιξη της αρχής της αδράνειας καθώς και τα προβλήματα που αυτή θα θέσει στις θεωρίες για την κίνηση. Ο στόχος είναι να δειχθεί ότι:

α) Η έννοια της νευτώνειας δύναμης, όπως τη χρησιμοποιούμε σήμερα, δεν προέκυψε άμεσα από την εμπειρία, αλλά δημιουργήθηκε και διαμορφώθηκε μετά από φιλοσοφικές συζητήσεις δύο αιώνων.

β) Η έννοια αυτή είναι σύνθετη και πολυεπίπεδη και ότι τα χαρακτηριστικά της, επομένως και το νόημά της, προσδιορίζονται από το συνολικό πλέγμα των εννοιών και νόμων της Δυναμικής.

γ) Το κύριο επιστημολογικό εμπόδιο στη δημιουργία μιας εμπειρικά επαρκούς Δυναμικής υπήρξε η ισχυρά εγκαθιδρυμένη άποψη, τουλάχιστον τον 17^ο αιώνα, ότι η «δύναμη» είναι μια εσωτερική ιδιότητα των σωμάτων και όχι εξωτερική δράση άλλων σωμάτων.

* Μέρος της εργασίας αυτής έχει ανακοινωθεί στην ημερίδα «Διδασκαλία και Μάθηση των Δυναμικών Αλληλεπιδράσεων» που έγινε τις 15 Μαΐου 2006 στην Παιδαγωγική Σχολή Φλώρινας.

1. Δύναμη και κίνηση

1.1. Οι δυνάμεις της Στατικής

Στη Στατική, βάρη ισορροπούν βάρη ή δυνάμεις ισορροπούν βάρη. Το βάρος όμως (πριν από το Νεύτωνα) δεν γίνεται αντιληπτό ως εξωτερική δύναμη αλλά ως εσωτερική ιδιότητα του σώματος¹. Το βάρος προκύπτει από την τάση του (βαρέως²) σώματος να κινηθεί προς το κέντρο της Γης. Το βαρύ σώμα όμως ασκεί δύναμη σε άλλα σώματα, η οποία σε απλές περιπτώσεις ισορροπίας ισούται με το βάρος του. Αν και μετρήσιμη (με ένα βάρος), η δύναμη αυτή είναι μια ασαφής έννοια και σχετίζεται, τουλάχιστον μέχρι τις αρχές του 17^{ου} αιώνα, με την αριστοτελική δύναμη.

Στην Αριστοτελική Φυσική υπάρχουν δύο είδη (τοπικών³) κινήσεων: οι φυσικές κινήσεις και οι βίαιες κινήσεις. Οι πρώτες (όπως π.χ. η πτώση ενός βαρέως σώματος) οφείλονται σε εσωτερικές αιτίες και δε χρειάζονται εξωτερικές δυνάμεις (το βάρος θεωρείται εσωτερική ιδιότητα του σώματος). Οι δεύτερες οφείλονται σε εξωτερική αιτία, σε μια κινούσα δύναμη, η οποία είναι απαραίτητη όχι μόνο για να ξεκινήσει η κίνηση αλλά και για να συντηρηθεί.

«Επειδή, τώρα, η φύση είναι η αρχή της κίνησης που υπάρχει στο κάθε σώμα, ενώ δύναμη (δύναμις) είναι η αρχή που υπάρχει σε κάποιο άλλο ή στο σώμα θεωρούμενο σαν άλλο, ενώ η κίνηση διακρίνεται σε κατά φύσιν και βίαια, η μεν κατά φύσιν, όπως αυτή που κάνει την πέτρα να πέφτει προς τα κάτω, επιταχύνεται (θάττω ποιήσει) και από τη δύναμη, ενώ η παρά φύσιν ορίζεται από τη δύναμη μόνο.» (Αριστοτέλης 1989 301b 17-21).

Η δύναμη αυτή είναι μια έννοια που έρχεται από την καθημερινή ζωή και συνδέεται με μια ασαφή έννοια «προσπάθειας» (Lindberg 1997, Lloyd 2005).

2.2. Ο Γαλιλαίος και η περιγραφή της κίνησης

Ο Γαλιλαίος δημοσιεύει τις τελικές του έρευνες για την κίνηση στο βιβλίο «*Συζητήσεις και μαθηματικές αποδείξεις σχετικά με δύο νέες επιστήμες...*» (*Discorsi et dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze...*) που εκδίδεται το 1638. Σε αυτό, μεταξύ άλλων, μελετά και περιγράφει μαθηματικά, ως επιταχυνόμενη κίνηση, την πτώση των σωμάτων (την οποία θεωρεί φυσική κίνηση), χωρίς να εξετάζει τις αιτίες που τη δημιουργούν.

«Το σήμερα δε φαίνεται να είναι ο κατάλληλος χρόνος για να ερευνήσουμε την αιτία της επιτάχυνσης της φυσικής κίνησης. Έχουν εκφρασθεί πολλές απόψεις από πολλούς φιλοσόφους. Κάποιοι την εξηγούν με έλξη προς το κέντρο, άλλοι με άπωση ανάμεσα στα πολύ μικρά τμήματα των σωμάτων ενώ άλλοι την αποδίδουν στην τάση του περιβάλλοντος μέσου να κλείνει πίσω από το σώμα που πέφτει και να το ωθεί από τη μια θέση στην άλλη. Όλες αυτές οι φαντασίες καθώς και άλλες θα έπρεπε να εξετασθούν, αλλά δεν αξίζει τον κόπο. Προς το παρόν, ο σκοπός του συγγραφέα είναι να ερευνήσει απλώς και να αποδείξει κάποιες από τις ιδιότητες της επιταχυνόμενης κίνησης, όποια και αν είναι η αιτία της.» (Galileo 1978 σελ. 202).

Στην έννοια της δύναμης ο Γαλιλαίος δεν ξεφεύγει πολύ από τις αριστοτελικές ιδέες. Η ρήξη του με τον αριστοτελισμό βρίσκεται στη διατύπωση της αρχής της αδράνειας (σε μια

¹ Αυτή είναι και η κυρίαρχη εναλλακτική άποψη των σημερινών μαθητών και πολλών φοιτητών (Kariotoglou & Spirtou 2005).

² Σύμφωνα με την επικρατούσα τον 17^ο αιώνα αριστοτελική άποψη, υπάρχουν τα (απολύτως) βαριά σώματα που κινούνται προς τα κάτω και τα (απολύτως) ελαφριά σώματα που κινούνται προς τα πάνω.

³ Στην Αριστοτελική Φυσική ο όρος κίνηση αναφέρεται σε κάθε είδους μεταβολή (γένεση, φθορά, ανάπτυξη κ.α.). Η τοπική κίνηση (δηλαδή η μετατόπιση στο χώρο) είναι μόνο μία από αυτές.

πρώτη μορφή), σύμφωνα με την οποία η ομοιόμορφη κίνηση σε λείο οριζόντιο επίπεδο είναι αέναη, αν δεν υπάρχει δύναμη για να την διαταράξει. Και η κυκλική κίνηση των πλανητών όμως είναι για το Γαλιλαίο ένα είδος φυσικής αδρανειακής κίνησης και δε χρειάζεται εξήγηση (Galileo 1978, Galileo 2001, Jamer 1999).

2. Η μηχανική των κρούσεων και η φυγόκεντρη δύναμη

2.1. Ο Descartes και η μηχανική των κρούσεων

Ο René Descartes διατυπώνει το σύστημα της Φυσικής Φιλοσοφίας του στις «*Αρχές της Φιλοσοφίας*» (*Principia Philosophiae*), που εκδίδεται το 1644. Το σύμπαν του Descartes αποτελείται από αενάως κινούμενα σωματίδια, τα οποία συγκρούονται συνεχώς και μεταδίδουν την κίνησή τους το ένα στο άλλο. Ο Θεός είναι αυτός που δημιουργήσε την κίνηση στην αρχή της δημιουργίας και έκτοτε η συνολική ποσότητά της κίνησης στο σύμπαν διατηρείται σταθερή. Όλες οι δράσεις ανάγονται σε κρούσεις και γίνονται εξ επαφής. Ακόμα και όταν φαίνεται να υπάρχει δράση από απόσταση (όπως π.χ. στον μαγνήτη), αυτή στην πραγματικότητα οφείλεται στη δράση εξ επαφής των αόρατων σωματιδίων του αιθέρα με τα σώματα.

Οι δύο πρώτοι «νόμοι της φύσης» του Descartes περιγράφουν την αρχή της αδράνειας στην τελική (σημερινή) της μορφή:

«Ο πρώτος νόμος της φύσης: το καθένα και όλα τα πράγματα, όσο μπορούν, πάντοτε συνεχίζουν στην ίδια κατάσταση· και έτσι ό,τι βρίσκεται σε κίνηση, πάντοτε συνεχίζει να κινείται...»

Ο δεύτερος νόμος της φύσης: όλες οι κινήσεις είναι αφ' εαυτών ευθύγραμμες. Επομένως κάθε σώμα που κινείται σε κύκλο πάντοτε τείνει να κινείται μακριά από το κέντρο του κύκλου που διαγράφει.» (Descartes 1998 §37 και §39).

Σύμφωνα με την άποψη αυτή η κυκλική κίνηση δεν είναι φυσική κίνηση και χρειάζεται εξωτερικές αιτίες για να συντηρηθεί. Τίθεται έτσι για πρώτη φορά το ζήτημα της εξήγησης της τροχιακής κίνησης των πλανητών και γενικότερα το αίτημα της δημιουργίας μιας Δυναμικής συνεπούς με την αρχή της αδράνειας.

Ο τρίτος νόμος του Descartes ασχολείται με την μεταβίβαση της κίνησης, που σύμφωνα με τη φιλοσοφία του γίνεται μόνο μέσω της κρούσης.

«Ο τρίτος νόμος: αν ένα σώμα συγκρουσθεί με ένα άλλο σώμα που είναι δυνατότερο (*fortiori*) από αυτό, δεν χάνει τίποτα από τη κίνησή του· Αλλά αν συγκρουσθεί με ένα ασθενέστερο (*minus forti*) σώμα, χάνει μια ποσότητα κίνησης ίση με αυτή που προσδίδει στο άλλο σώμα.» (Στο ίδιο §40).

Αυτό που καθορίζει τη συμπεριφορά των σωμάτων στην κρούση είναι πόσο «δυνατά» είναι τα σώματα ως προς αυτήν, η «δύναμη» που κατέχουν. Ο Descartes και οι επίγονοί του θα ξεκαθαρίσουν ότι «δύναμη» αυτή, μια εσωτερική ιδιότητα των κινούμενων σωμάτων, είναι ανάλογη με την «ποσότητα κίνησης» τους, δηλαδή ανάλογη με το «μέγεθός» τους (αργότερα θα γίνει μάζα) και με την ταχύτητά τους ($m \cdot v$). Η συνολική «δύναμη» - «ποσότητα κίνησης» στο σύμπαν διατηρείται σταθερή (Descartes 1998, Κανδεράκης 2005).

2.2. Ο Huygens και η φυγόκεντρη δύναμη

Ο Christiaan Huygens μελετά συστηματικά την κυκλική κίνηση και οι έρευνές του δημοσιεύονται, το 1703 με τίτλο «*Περί της φυγόκεντρης δύναμης*» (*De vi centrifuga*), (Huygens 1929). Μέρος των συμπερασμάτων του παρουσιάζεται το 1673 στο «*Horologium oscillatorium*» (Huygens 1673). Ο Huygens θεωρεί την κυκλική κίνηση ως δεδομένη, ως μια δεσμευμένη κίνηση όπου το κινούμενο σώμα, για κάποιες άγνωστες αιτίες που δεν τον ενδιαφέρουν, διαγράφει κύκλο. Αυτό που εξετάζει είναι η τάση (*conatus*) του

περιστρεφόμενου σώματος να απομακρυνθεί από το κέντρο (λόγω της αδράνειάς του). Την τάση αυτή την ονομάζει «φυγόκεντρη δύναμη» και τη μετρά με την απόσταση κατά την οποία το σώμα θα απέκλινε από τον κύκλο, σε μια μικρή μονάδα χρόνου, αν ελευθερώνονταν και κινούνταν στην εφαπτομένη του κύκλου⁴. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζει τη φυγόκεντρη δύναμη και δείχνει ότι:

«Αν ένα κινητό διαγράφει περιφέρεια κύκλου με την ταχύτητα που θα αποκτούσε αν έπεφτε από ύψος ίσο με το ένα τέταρτο της διαμέτρου, θα είχε μια τάση να απομακρύνεται από το κέντρο ίση με τη βαρύτητά του, δηλαδή θα τραβούσε το νήμα από το οποίο κρατιέται με την ίδια δύναμη που θα είχε αν κρέμονταν από αυτό.» (Huygens 1929 σελ. 274)

Η έκφραση αυτή ισοδυναμεί με τον σημερινό νόμο της φυγόκεντρης δύναμης⁵ (Huygens 1929, Jamer 1999, Dugas 1988).

3. Ο Leibniz και η «ζωντανή δύναμη»

Σε μια σειρά άρθρων που δημοσιοποιούνται από το 1686 έως το 1716, ο Leibniz διακρίνει τις «νεκρές δυνάμεις» (*vis mortuae*), που είναι οι δυνάμεις της Στατικής, από τις «ζωντανές δυνάμεις» (*vis viva*), που είναι οι «δυνάμεις» της Δυναμικής, δηλαδή οι «δυνάμεις» των κινούμενων σωμάτων. Οι «ζωντανές δυνάμεις» παράγονται από τις συνεχείς δράσεις των «νεκρών δυνάμεων» και ενυπάρχουν μέσα στα κινούμενα σώματα. Με τη συνεχή δράση της βαρύτητας π.χ. το σώμα που πέφτει αποκτά «ζωντανή δύναμη», ενώ, όπως θα δείξει ο (οπαδός του Leibniz) Johann Bernoulli, η συνεχής (αλλά όχι σταθερή) δράση του συσπειρωμένου ελατηρίου παράγει «ζωντανή δύναμη» στο σώμα που αυτό εκτινάσσει.

Ο Leibniz μετρά τις «ζωντανές δυνάμεις» με τις αιτίες που τις δημιουργούν (ή με τα αποτελέσματα που μπορούν να παράγουν). Στην πτώση ενός σώματος π.χ. η αιτία της «ζωντανής δύναμης» είναι η κάθοδος του βάρους του και μέτρο της το γινόμενο του βάρους με το ύψος καθόδου. Έτσι, η «ζωντανή δύναμη» προκύπτει ανάλογη με τη μάζα του σώματος και με το τετράγωνο της ταχύτητας που αυτό αποκτά (δηλαδή ανάλογη με $m \cdot v^2$). Στην εκτίναξη ενός σώματος από ελατήριο, ο Johann Bernoulli υπολογίζει τη «ζωντανή δύναμη» με το ολοκλήρωμα $\int p dx$, όπου p είναι η «πίεση» που ασκεί το ελατήριο και x η μετατόπιση, και τη βρίσκει ανάλογη με $m \cdot v^2$. Με τις κρούσεις, οι «ζωντανές δυνάμεις» μεταβιβάζονται από σώμα σε σώμα, χωρίς να καταστρέφονται. Η συνολική «ζωντανή δύναμη» στο σύμπαν διατηρείται σταθερή. (Leibniz 1971, Leibniz 1989, Κανδεράκης 2005).

4. Ο Νεύτων και η θεμελίωση της δυναμικής

Ο Ισαάκ Νεύτων ασχολείται για περισσότερα από 30 χρόνια με τα ζητήματα που θέτει στη Δυναμική η αρχή της αδράνειας. Τέτοια είναι π.χ. πώς παράγεται η επιταχυνόμενη κίνηση στην ελεύθερη πτώση, τί αναγκάζει τους πλανήτες να κάνουν ελλειπτική κίνηση, πώς εξηγούνται οι νόμοι του Kepler, τί σχέση έχει η κίνηση των πλανητών με την πτώση των σωμάτων κ.α. Τα αρχεία του μας δείχνουν την αργή και βασανιστική πορεία του προς τη διαμόρφωση της ιδέας μιας εξωτερικής δύναμης που μεταβάλλει την κίνηση και τελικά στην λύση των προβλημάτων αυτών. Το υπόβαθρο για την ιδέα αυτή φαίνεται να αναπτύσσεται έξω από χώρο της Μηχανικής (και της επίσημης Φυσικής Φιλοσοφίας). Ο Νεύτων ασχολείται για πολλά χρόνια με την Αλχημεία και εξοικειώνεται με μια από τις κεντρικές της ιδέες, με

⁴ Ακόμα και την βαρύτητα ο Huygens την θεωρεί ως «τάση (conatus) των σωμάτων να κατεβαίνουν» και τη μετρά με παρόμοιο τρόπο.

⁵ Με τη σημερινή αλγεβρική διατύπωση, ο Huygens συμπεραίνει ότι αν $v^2 = 2gh = 2gR/2 = gR$, τότε $F_{\text{φυγ.}} = mg$. Από τις δύο αυτές σχέσεις προκύπτει ότι $F_{\text{φυγ.}} = mv^2/R$.

την ύπαρξη «ενεργών αρχών» (active principles) στην ύλη, οι οποίες λειτουργούν ως πρωταρχικές αιτίες για τα φυσικά φαινόμενα. Οι έρευνές του αυτές φαίνεται να τον προετοιμάζουν για την ιδέα της ελκτικής βαρυτικής δύναμης εξ αποστάσεως, τουλάχιστον μέχρι το 1679 όμως οι υπολογισμοί του πάνω στην τροχιακή κίνηση των πλανητών διατυπώνονται με όρους φυγόκεντρης δύναμης, δηλαδή με τους όρους του Descartes και του Huygens (Westfall 1983, Dobbs & Jacob 1995, Bertoloni Meli 2006). Το 1679 παίρνει μια επιστολή από τον Robert Hooke, τότε γραμματέα στη Royal Society, στην οποία η κίνηση των πλανητών σκιαγραφείται με όρους μιας έλξης προς το κέντρο και όχι μιας τάσης για απομάκρυνση από το κέντρο:

«Από μέρους μου θα το θεωρούσα ως μεγάλη χάρη αν μου γνωστοποιούσατε με επιστολή τις αντιρρήσεις σας σε κάθε υπόθεση ή άποψή μου. Ειδικότερα αν μου γνωστοποιούσατε τις σκέψεις σας για τη σύνθεση των ουράνιων κινήσεων των πλανητών από μια ευθύγραμμη κίνηση στην εφαπτομένη και μια ελκτική κίνηση προς το κεντρικό σώμα.» (Hooke στο Νεύτωνα, Νοεμβρ. 1679, όπως παρατίθεται στο Κουρέ 1965 σελ. 229-230).

Τις υποθέσεις αυτές ο Hooke τις είχε διατυπώσει πιο αναλυτικά στην «Προσπάθεια να αποδειχθεί η κίνηση της Γης από παρατηρήσεις» (*Attempt to prove the motion of the Earth from observations*), που διαβάστηκε στη Royal Society το 1671 και δημοσιεύθηκε το 1674. Οι υποθέσεις αυτές καταγράφονται συνοπτικά σε μια παρουσίαση του βιβλίου που γίνεται στο τεύχος του Μαρτίου 1674 των *Philosophical Transactions*⁶, μάλλον από τον ίδιο τον Hooke (Hooke 1674).

«Αυτό το σύστημα [του κόσμου] υποστηρίζεται ότι εξαρτάται από τρεις υποθέσεις. 1. Ότι όλα τα ουράνια σώματα διαθέτουν μια έλξη ή βαρυτική δύναμη (gravitating power) προς τα κέντρα τους, με την οποία έλκουν όχι μόνο τα τμήματά τους και τα κρατούν ώστε να μην απομακρύνονται (όπως παρατηρούμε ότι κάνει η Γη), αλλά επίσης και όλα τα ουράνια σώματα που βρίσκονται μέσα στη σφαίρα της δράσης τους. 2. Ότι όλα τα σώματα που τίθενται σε ευθεία και απλή κίνηση θα συνεχίσουν να κινούνται σε ευθεία γραμμή, μέχρις ότου εκτραπούν από κάποια άλλη περισσότερο δραστηκή δύναμη (effectual powers) και καταλήξουν σε μια κίνηση που διαγράφει καμπύλη γραμμή. 3. Ότι αυτές οι ελκτικές δυνάμεις είναι τόσο πιο ισχυρές στη δράση τους όσο πιο κοντά βρίσκεται στα κέντρα τους το ενεργοποιούμενο σώμα.» (Hooke 1674, σελ. 19).

Η επιστολή του Hooke φαίνεται να δίνει το έναυσμα στο Νεύτωνα να αναδιατυπώσει τις έρευνές του για τις πλανητικές κινήσεις με όρους ελκτικών δυνάμεων προς το κέντρο⁷ και να οδηγηθεί στις «Μαθηματικές αρχές της φυσικής φιλοσοφίας» (*Philosophiae naturalis principia mathematica*), τις οποίες δημοσιεύει το 1687 (Cohen 1985, Dobbs & Jacob 1995). Κεντρικό μέγεθος σ' αυτές είναι η δύναμη, ένα εξωτερικό στα κινούμενα σώματα αίτιο, που μεταβάλλει την κίνηση τους.

«Ορισμός IV. Μια επιβαλλόμενη δύναμη (vis impressa) είναι μια δράση που ασκείται πάνω σε ένα σώμα για να αλλάξει την κατάστασή του είτε της ηρεμίας είτε της ομοιόμορφης κίνησης σε ευθεία γραμμή. Αυτή η δύναμη συνίσταται στη δράση μόνο και δεν παραμένει στο σώμα όταν η δράση σταματήσει.» (Newton 1999 σελ. 404).

Σχετικός είναι και ο δεύτερος νόμος του (ο πρώτος αφορά την αρχή της αδράνειας):

⁶ Είναι το περιοδικό που εκδίδει η Royal Society.

⁷ Ο Νεύτων είχε μια πικρόχολη διαμάχη με τον Hooke για την πατρότητα του νόμου της παγκόσμιας έλξης και δεν παραδέχθηκε τις οφειλές του στον Hooke.

«Νόμος II. Η μεταβολή της κίνησης είναι ανάλογη με την επιβαλλόμενη κινούσα δύναμη και γίνεται στη κατεύθυνση της ευθείας γραμμής στην οποία αυτή η δύναμη επιβάλλεται.» (Στο ίδιο σελ. 416)

Παρατηρούμε ότι για το Νεύτωνα η δύναμη είναι ανάλογη με τη μεταβολή της κίνησης (δηλαδή, με τον σημερινό συμβολισμό, ανάλογη με Δmv) και όχι ανάλογη με το ρυθμό της μεταβολής της κίνησης ($\Delta mv/\Delta t$), όπως είναι η σημερινή διατύπωση του νόμου. Αυτό, σύμφωνα με τους ιστορικούς, οφείλεται στην επιρροή της καρτεσιανής φυσικής και της μηχανικής των κρούσεων του 17^{ου} αιώνα, που βλέπει τις κρούσεις ως τους μοναδικούς τρόπους δράσης και ως ακαριαίες⁸ διαδικασίες (βλέπε στην εισαγωγή του I.B. Cohen για το Newton 1999).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της νευτώνειας δύναμης είναι ο ουσιαστικά διπλός – συστημικός χαρακτήρας της, όπως παρουσιάζεται με τον 3^ο νόμο. Κάθε δύναμη συνοδεύεται πάντοτε από μια αντίδραση.

«Νόμος III. Σε κάθε δράση υπάρχει πάντοτε μια αντίθετη και ίση αντίδραση. Με άλλα λόγια, οι δράσεις δύο σωμάτων του ενός πάνω στο άλλο είναι πάντοτε ίσες και πάντοτε σε αντίθετη κατεύθυνση.» (Στο ίδιο σελ. 417).

Όπως καταλαβαίνουμε και από το σχόλιο που γράφει ο Νεύτων στο τέλος του σχετικού κεφαλαίου, ο 3^{ος} νόμος φαίνεται να προκύπτει άμεσα από τους νόμους της κρούσης (όπως τουλάχιστον είχαν διαμορφωθεί από τον Descartes και τους επιγόνους του). Αφού ένα σώμα που συγκρούεται δίνει στο άλλο σώμα τόση κίνηση («ποσότητα κίνησης») όση ακριβώς είναι αυτή που χάνει και αφού η μεταβολή της κίνησης είναι ίση με τη δύναμη, οι ίσες μεταβολές στην κίνηση συνεπάγονται και ίσες δυνάμεις. Ο Νεύτων κάνει πειράματα με εκκρεμή που συγκρούονται, προσπαθώντας να δείξει πειραματικά το πρώτο, ώστε να συμπεράνει με ασφάλεια το δεύτερο.

«Κάνοντας ένα πείραμα, με αυτό τον τρόπο, με εκκρεμή δέκα ποδιών, χρησιμοποιώντας άνισα αλλά και ίσα βάρη και κάνοντας τα σώματα να συγκρουστούν από μεγάλες αποστάσεις, ας πούμε οκτώ ή δώδεκα ή δεκαέξι ποδιών, πάντοτε έβρισκα – με σφάλμα στη μέτρηση λιγότερο από τρεις ίντσες – ότι όταν τα σώματα συγκρούονταν μετωπικά, οι μεταβολές στις κινήσεις των σωμάτων γίνονταν σε αντίθετες κατευθύνσεις και ήταν ίσες. Κατά συνέπεια η δράση και η αντίδραση ήταν πάντοτε ίσες.» (Στο ίδιο σελ. 426).

Εκτός όμως από την επιβαλλόμενη εξωτερική δύναμη, παρουσιάζεται στις «*Principia*» και μια άλλη «δύναμη»: η «έμφυτη δύναμη» (*vis insita*) ή «δύναμη της αδράνειας».

«Ορισμός III. Έμφυτη δύναμη της ύλης είναι η δύναμη αντίστασης με την οποία κάθε σώμα, όσο είναι δυνατόν, διατηρεί την κατάστασή του είτε της ηρεμίας είτε της ομοιόμορφης κίνησης ευθεία μπροστά.» (Στο ίδιο σελ. 404).

Στο σχόλιο που γράφει γι' αυτήν, ο Νεύτων επεξηγεί ότι η «έμφυτη δύναμη» ασκείται από το σώμα μόνο όταν μια εξωτερική δύναμη μεταβάλλει την κατάστασή του (της ηρεμίας ή της κίνησης) και μόνο κατά τη διάρκεια της μεταβολής αυτής. Η έννοια αυτή, που ο Νεύτων συνδέει με τη φυγόκεντρη δύναμη, υποδηλώνει έμμεσα ότι η κίνηση συνοδεύεται από μια εσωτερική «δύναμη» που τη συντηρεί και, κατά πάσα πιθανότητα, είναι ένα υπόλειμμα καρτεσιανών αλλά και προκλασικών (αριστοτελικών - μεσαιωνικών) απόψεων για την κίνηση (Westfall 1971, εισαγωγή του I. B. Cohen στο Newton 1999, Bertoloni Meli 2006). Η ιδέα της εσωτερικής «δύναμης» των κινούμενων σωμάτων, η οποία κυριαρχεί στη Φυσική Φιλοσοφία του 17^{ου} αιώνα, φαίνεται να λειτουργεί ως επιστημολογικό εμπόδιο στη

⁸ Τουλάχιστον όταν συγκρούονται τα «σκληρά» σωματίδια από τα οποία αποτελούνται τα σώματα.

διαμόρφωση και στην αποδοχή της νευτώνειας δύναμης και χρειάστηκε μακροχρόνια διανοητική προσπάθεια για να ξεπεραστεί.

5. Η πρόσληψη του νευτωνισμού στην ηπειρωτική Ευρώπη του 18^ο αιώνα και οι αναδιατυπώσεις της (Νευτώνειας) Μηχανικής

Στη Γαλλία η Νευτώνεια Μηχανική συνδιαλέγεται με τον κυρίαρχο καρτεσιανισμό και τροποποιείται από αυτόν ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ενσωματώνονται σε αυτήν και λαϊβνίτειες ιδέες. Πρακτικά, η Νευτώνεια Μηχανική γίνεται αποδεκτή ως μια καλή μαθηματική περιγραφή του κόσμου, κρατείται όμως και η Καρτεσιανή Φυσική για την αιτιακή εξήγηση του κόσμου. Κάτι ανάλογο γίνεται λίγο-πολύ και στη υπόλοιπη Ευρώπη. Αυτό που ενοχλεί ιδιαίτερα τους ηπειρωτικούς είναι η έννοια της δύναμης από απόσταση, την οποία θεωρούν απόκρυφη και μυστικιστική. Αρκετοί μαθηματικοί, όπως π.χ. ο d' Alembert ή ο Maupertuis, θα προσπαθήσουν να δημιουργήσουν Δυναμικές χωρίς τις νευτώνειες δυνάμεις, χωρίς όμως να απαλλαγούν από αυτές εντελώς. Συγχρόνως, οι ηπειρωτικοί μαθηματικοί αναπτύσσουν και χρησιμοποιούν τον Απειροστικό Λογισμό στη Μηχανική (στη λαϊβνίτεια εκδοχή του), ενώ σταδιακά την αναδιατυπώνουν στη γλώσσα της Άλγεβρας (ο Νεύτωνας είχε χρησιμοποιήσει τη γλώσσα της Ευκλείδειας Γεωμετρίας). Σημαντικά πρόσωπα στη διαδικασία της αλγεβρικής - αναλυτικής αναδιατύπωσης της Μηχανικής είναι ο Piere Varignon και ο Leonard Euler (Hankins 1967, Blay 1992). Ο Varignon μεταγράφει σε αλγεβρική - αναλυτική μορφή την Κινηματική (Varignon 1700), ενώ ο Euler κάνει το ίδιο για τη Δυναμική (Euler 1736 και Euler 1752).

Ο Jean le Rond d' Alembert στην «Πραγματεία Δυναμικής» (*Traité de dynamique*), που εκδίδει το 1743, προσπαθεί να δημιουργήσει μια Δυναμική καθαρά κινηματική, χωρίς τις νευτώνειες δυνάμεις. Ενώ όμως τις εξαλείφει από τη θεωρία, αναγκάζεται να τις χρησιμοποιήσει στις εφαρμογές. Ο d' Alembert θεωρεί ότι η ιδέα της «δύναμης» είναι ασαφής και έχει νόημα μόνο όταν σηματοδοτεί ένα παρατηρούμενο αποτέλεσμα. Επειδή όμως τα αποτελέσματα ποικίλουν ανάλογα με την περίπτωση, υπάρχουν και διαφορετικές μορφές «δύναμης». Αυτές είναι: η «νεκρή δύναμη», όταν η κίνηση εμποδίζεται εντελώς· η «ποσότητα κίνησης», όταν η κίνηση είναι ομοιόμορφη· και η «ζωντανή δύναμη», όταν η κίνηση επιβραδύνεται υπερνικώντας εμπόδια (d' Alembert 1743).

Καθώς η ιδέα της νευτώνειας δύναμης, λόγω και τις αποτελεσματικότητάς της στη λύση των προβλημάτων, γίνεται σταδιακά αποδεκτή (ή τουλάχιστον οι αρχικές αντιρρήσεις εναντίον της μπαίνουν για την ώρα στην άκρη), οι άλλες «δυνάμεις», δηλαδή η «ποσότητα της κίνησης» και η «ζωντανή δύναμη», εξακολουθούν να βρίσκονται εν χρήσει, πράγμα που δημιουργεί σύγχυση. Χαρακτηριστικό είναι ότι ο Lagrange, στην «Αναλυτική μηχανική» (*Mécanique Analytique*) που εκδίδει το 1788, χρησιμοποιεί τέσσερις όρους που αναφέρονται στη «δύναμη»: την «επιταχύνουσα δύναμη» (dv/dt) που είναι μια επιτάχυνση (αλλά με αιτιακές ιδιότητες δύναμης), τη «δύναμη των κινούμενων σωμάτων» ($m \cdot v$), την «πίεση» ή «κινήτρια δύναμη» ($m \cdot dv/dt$) που αντιστοιχεί στη νευτώνεια δύναμη και τη «ζωντανή δύναμη» ($m \cdot v^2$), (Lagrange 1788).

Η διαφοροποίηση των εννοιών της δύναμης θα γίνει τελικά με τη συγκρότηση της έννοιας της ενέργειας, και των ενεργειακών εννοιών εν γένει, γύρω στα μέσα του 19ου αιώνα. Η νευτώνεια δύναμη θα διατηρήσει το όνομα «δύναμη», η «δύναμη των κινούμενων σωμάτων» ως «ποσότητα κίνησης» ($m \cdot v$) θα κρατήσει το όνομα «ορμή» (momentum), ενώ η «ζωντανή δύναμη» ($m \cdot v^2$) θα ονομασθεί «κινητική ενέργεια».

Συμπεράσματα και διδακτικές επισημάνσεις

Τί μας δείχνει η εξιστόρηση αυτή σε σχέση και με τη Διδακτική; Πρώτον, ότι η ιστορία της συγκρότησης και της αποσαφήνισης της έννοιας της δύναμης είναι μια εξαιρετικά σύνθετη και περίπλοκη διαδικασία που κρατά πάνω από δύο αιώνες. Αυτό κατ' αρχάς μας λέει ότι είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιήσουμε στη διδασκαλία την ιστορία αυτή ως έχει. Δεύτερον, ότι η έννοια της νευτώνειας δύναμης, με όλα τα χαρακτηριστικά που την καθορίζουν, δηλαδή ότι είναι εξωτερική για το σώμα πάνω στο οποίο δρα, ότι μεταβάλλει την κίνηση ενώ δεν χρειάζεται για να συντηρηθεί η κίνηση και ότι έχει ένα διπλό - συστημικό χαρακτήρα, δεν είναι κάτι που μπορεί να προκύψει άμεσα από την εμπειρία. Τρίτον, ότι το εννοιολογικό περιεχόμενο της νευτώνειας δύναμης εμπεριέχει μεγάλο μέρος από το περιεχόμενο των τριών νόμων ή, πιο απλά, ότι η νευτώνεια δύναμη προσδιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τους τρεις νόμους. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια κυκλικότητα και ένας ολιστικός χαρακτήρας στη νευτώνεια Δυναμική, πράγμα που φορτώνει μια επιπλέον δυσκολία στη διδασκαλία της. Τέλος, ότι η «δύναμη» θεωρήθηκε εσωτερική ιδιότητα των σωμάτων στο μεγαλύτερο μέρος του 17^{ου} αιώνα και ότι για να ξεπεραστεί αυτό χρειάστηκε επίπονη και μακροχρόνια διανοητική προσπάθεια. Κάτι ανάλογο μας δείχνουν οι έρευνες στη Διδακτική των Φυσικών Επιστημών. Σύμφωνα με αυτές, η «δύναμη» ως εσωτερική ιδιότητα των σωμάτων είναι μια από τις επικρατέστερες εναλλακτικές ιδέες των μαθητών για τη δύναμη και ένα σημαντικό εννοιολογικό εμπόδιο στην προσέγγιση της νευτώνειας εκδοχής της (Ioannides & Vosniadou 2002, Kariotoglou & Spirtou 2005). Εν κατακλείδι, η ιστορία της δύναμης μας αποκαλύπτει ότι η έννοια αυτή είναι πιο σύνθετη από ό,τι συνήθως νομίζεται και ότι χρειάζονται επεξεργασμένες στρατηγικές για να τη διδάξουμε. Κάποια τμήματα της ιστορίας της, διδακτικά μετασχηματισμένα, ίσως φανούν χρήσιμα σε αυτό.

Παραπομπές

- Αριστοτέλης. (1989). Περί ουρανού, μετφρ. Π. Παναγιώτου. Αθήνα. Νέα Σύνορα – Λιβάνης.
- Κανδεράκης Ν. (2005). Η συγκρότηση της έννοιας του έργου στη μηχανική: φιλόσοφοι, μαθηματικοί και μηχανικοί σε αλληλεπίδραση, διδακτορική διατριβή. Αθήνα, Ε.Κ.Π.Α και Ε.Μ.Π.
- Lindberg D. (1997). Οι απαρχές της δυτικής επιστήμης: η φιλοσοφική, θρησκευτική και θεσμική θεώρηση της ευρωπαϊκής επιστημονικής παράδοσης 600π.Χ.-1450μ.Χ., μετφρ. Η. Μαρκολέφας. Αθήνα, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Lloyd G.E.R. (2005). Αρχαία ελληνική επιστήμη: από τον Θαλή ως τον Αριστοτέλη, μετφρ. Π. Καρλέτσα. Ηράκλειο, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- d' Alembert J. R. (1758). *Traité de dynamique* (2^e éd.). Paris, David Libraire, fac-sim par J. Gabay (ed.), 1990.
- Bertoloni Meli D. (2006). Inherent and centrifugal forces in Newton. *Archives for the History of the Exact Sciences*, 60, 319-335.
- Blay M. (1992). *La naissance de la mécanique analytique: la science du mouvement au tournant des XVII^e et XVIII^e siècles*. Paris, Presses Universitaires de France.
- Cohen I. B. (1985). *The birth of a new physics*. Harmondsworth Middlesex, Penguin.
- Dobbs B. J. & Jacob M. (1995). *Newton and the culture of newtonianism*. New Jersey, Humanities Press.
- Dugas R. (1988). *A history of mechanics*, trans. By J. R. Madox. New York, Dover.
- Descartes R. (1998). *Principles of philosophy. The philosophical writings of Descartes*, vol. I, trans. by J. Gottingham et al, 177-291. Cambridge, Cambridge University Press
- Euler L. (1736). *Mechanica sive motus scientia analytice exposita*. Petropoli.

- Euler L. (1752). Decouvert d' un nouveau principe de mecanique. Mémoires de l' Académie des Sciences de Berlin, 6, 185-217.
- Galileo Galilei. (1978). Dialogues concerning two new sciences, transl. by H. Crew & A. de Salvio. Great books of the western world, vol. 28, Gilbert, Galileo, Harvey, 129-260. Chicago, Encyclopaedia Britannica.
- Galileo Galilei. (2001). Dialogue concerning the two chief world systems: ptolemaic and copernican, transl. S. Drake. New York, Modern Library.
- Hankins T. (1967). The reception of Newton's second law of motion in the eighteenth century. Archives Internationals d' Histoire des Sciences, 78-79, pp 43-65.
- Hooke R. (1674). An account of the book "Attempt to prove the motion of the Earth from observations", made by Robert Hooke, fellow of the Royal Society. Philosophical Transactions, 101, March 25, vol. IX, pp 18-19.
- Huygens C. (1673). Horologium oscillatorium sive de motu pentulorum ad horologia aptato demonstrations geometricae. Paris.
- Huygens C. (1929). Sur la force centrifuge. Œuvres complètes de Christiaan Huygens, vol. 16, 237-325. La Haye, Martinus Nijhoff.
- Ioannides C. & Vosniadou S. (2002). The Changing Meanings of Force. Cognitive Science Quarterly, 2 (1), pp. 5 – 62.
- Jamer M. (1999). Concepts of force. New York, Dover.
- Kariotoglou P. & Spyrtou A. (2005). A teaching – learning sequence concerning dynamic interactions: the need for appropriate software. In P. Michailides and A. Margetousaki, Proceedings of the 2nd International Conference, Hands-on Science: Science in an Changing Education, pp. 91-95. Rethymno.
- Koyré A. (1965). Newtonian studies. Chicago, University of Chicago Press.
- Lagrange J. L. (1788). Mécanique Analytique. Paris, Veuve Desaint. fac. sim. J. Gabay 1989.
- Leibniz G. W. (1971). Essay de dynamique. G. W. Leibniz Mathematische schriften, ed. C. I. Gerhardt, vol. VI, 215-233. Hildesheim, Georg Olms Verlag.
- Leibniz G. W. (1989). Specimen dynamicum. Leibniz: Philosophical papers and letters, ed. by L. Loemker, 435-452. Dordrecht, Kluwer.
- Newton I. (1999). The principia: mathematical principles of natural philosophy, trans. by I. B. Cohen and A. Whitman. Berkeley, University of California Press.
- Varignon P. (1700). Manière générale de déterminer les forces, les vitesses, les espaces, et les temps, une seule de ces quatre choses étant donnée dans toutes fortes de mouvements rectilignes variés à discrétion. Histoire de l' Académie Royale des Sciences, année 1700, 22-27, Paris.
- Westfall R. (1971). Force in Newton's physics. London, Macdonald.
- Westfall R. (1983). Never at rest: a biography of Isaac Newton. Cambridge, Cambridge University Press.