

2

Η ενέργεια στην ιστορία της επιστήμης

Η ιστορική προσέγγιση της έννοιας της ενέργειας μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά ως προς την επιστημολογική ανάλυση που επιχειρήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο παρέχοντας πληροφορίες για την γέννηση και την εξέλιξη των δυο βασικών θεωρητικών πλαισίων που αναπτύξαμε και αποσαφηνίζοντας το περιεχόμενο διαφόρων ενεργειακών εννοιών. Συγχρόνως, όμως, εντάσσεται και σε μια σύγχρονη ερευνητική τάση στο χώρο της Διδακτικής των φυσικών επιστημών η οποία θεωρεί ότι η συσχέτιση της διδασκαλίας με την ιστορία της επιστήμης και η εισαγωγή ιστορικών στοιχείων στη διδασκαλία είναι δυνατόν να συνεισφέρει στη βελτίωση τόσο του σχεδιασμού διδακτικού υλικού όσο και στην κατανόηση της γνώσης και της φύσης των φυσικών επιστημών από τους μαθητές (Matthews, 2007; Κολιόπουλος, 2012). Τα τελευταία χρόνια όλο και αυξάνονται οι εργασίες που, στα πλαίσια του παραπάνω ρεύματος, συνδέουν στοιχεία της ιστορίας της ενέργειας με τη διδασκαλία ως πλαίσιο πληρέστερης κατανόησης των ενεργειακών εννοιών, είτε ως διδακτικές προτάσεις (Drago, 1994; Coelho, 2009; Kanderakis, 2012; Bevilacqua, 2014; Bächtold & Guedj, 2014; Meli & Koliopoulos, 2019c).

2.1 Η προ-ενεργειακή περίοδος

2.1.1 Οι προ-ενεργειακές έννοιες στα μηχανικά φαινόμενα

Αν και η ιδέα ότι κάτι παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια φυσικών αλλαγών φαίνεται ότι έχει διατυπωθεί από πολύ παλιά, όπως σε κείμενα του Παρμενίδη και του Ήρωνα του Αλεξανδρινού (Lindsay, 1975), μόνο γύρω στα 1600 έχουμε διατυπώσεις για τις οποίες μπορεί να ισχυριστεί κάποιος ότι έχουν κάποια σχέση με τις σύγχρονες ενεργειακές αντιλήψεις, όπως π.χ., με την έννοια του έργου. Οι αντιλήψεις αυτές παρουσιάζονται, κατ' αρχήν, ως κατανόηση της αδυναμίας παραγωγής αέ-

νης κίνησης σε απλά μηχανικά συστήματα, όπως στο κεκλιμένο επίπεδο, στους μοχλούς και το απλό εκκρεμές, όπου γίνεται συνείδηση ότι δεν μπορεί να κερδηθεί κάτι απ' το τίποτα. Ο Huygens, για παράδειγμα, γράφει ότι «η ανακάλυψη όλων των απλών μηχανών βασίζεται σε μία και μόνη αρχή που λέει ότι 'η ίδια δύναμη που απαιτείται για ν' ανυψωθεί ένα βάρος π.χ. 100 λιβρών σε ύψος 2 ποδιών απαιτείται για ν' ανυψωθεί ένα άλλο 200 λιβρών σε ύψος 1 ποδιού ή ένα 400 λιβρών κατά μισό πόδι'» (Halbwachs, 1980). Στη διατύπωση αυτή, αν η λέξη δύναμη αντικατασταθεί από τη λέξη έργο τότε δεν έχουμε παρά ένα μέρος του σύγχρονου ορισμού της έννοιας του έργου (γινόμενο βάρους επί ύψος). Οι Descartes και Γαλιλαίος, επίσης, προχωρούν σε διατυπώσεις που αντιστοιχούν στη σύγχρονη *αρχή των δυνατών έργων*, την ισότητα, δηλαδή, κινητήριου έργου και έργου αντιστάσεως σε μια απλή μηχανή (Lindsay, 1975). Το ενδιαφέρον στοιχείο, εδώ, είναι ότι οι διατυπώσεις αυτές είναι γενικευμένες, δηλαδή, αφορούν το σύνολο των απλών μηχανών.

Η ιδέα, πάντως, του να παραμένει κάτι σταθερό κατά τη διάρκεια φυσικών αλλαγών αναπτύσσεται ιδιαίτερα όχι τόσο στα πλαίσια της στατικής αλλά της δυναμικής διαπραγμάτευσης των μηχανικών φαινομένων. Στο δεύτερο μισό του 17ου αιώνα ο Leibniz προτείνει την έννοια της *vis viva* (ζωτική δύναμη). Επρόκειτο για μια ποσοτική έννοια (γινόμενο της μάζας ενός σώματος επί το τετράγωνο της ταχύτητάς του - για ένα σώμα) που αντιστοιχεί στην σύγχρονη έννοια της κινητικής ενέργειας και η οποία εφαρμόστηκε σε προβλήματα κίνησης μηχανικών συστημάτων. Ο Huygens διατυπώνει την *αρχή διατήρησης της ζωτικής δύναμης* σε προβλήματα κρούσεων. Μια παρεμφερή έννοια είχε χρησιμοποιήσει προηγουμένα ο Descartes την οποία ονόμασε ποσότητα κίνησης (γινόμενο της μάζας του σώματος επί την ταχύτητά του - για ένα σώμα). Αν και η έννοια αυτή φαίνεται ν' αντιστοιχεί στην σύγχρονη έννοια της ορμής, σύμφωνα με τον Halbwachs (1980), είχε, μάλλον, το *status* της κινητικής ενέργειας, δηλαδή, μιας ποσότητας θετικής και προσθετικής σε αντίθεση με τα χαρακτηριστικά της έννοιας της ορμής (διανυσματικό μέγεθος στα πλαίσια του Νευτωνικού θεωρητικού πλαισίου).

Ένα βασικό στοιχείο, τόσο στους συλλογισμούς του Huygens όσο και του Descartes είναι ότι διατυπώνοντας τις αρχές διατήρησης της ζωτικής δύναμης και της ποσότητας κίνησης εισάγουν την ισοδυναμία ταχύτητας του σώματος και ύψους στο οποίο μπορεί να φθάσει ή από το οποίο μπορεί να πέσει το σώμα. Ο Huygens, για παράδειγμα, για να δείξει ότι δύο σώματα ανταλλάσσουν ταχύτητες όταν συγκρουθούν ελαστικά, συνδέει την οριζόντια κίνηση των συγκρουόμενων σωμάτων με μια ισοδύναμη κατακόρυφη κίνηση. Κατά τη διάρκεια της αλλαγής της κίνησης από κατακόρυφη σε οριζόντια διατηρούνται και μεταφέρονται τα (ενεργειακά) χαρακτηριστικά της πτώσης στην οριζόντια κίνηση (Halbwachs, 1980).

Η συσχέτιση της ζωτικής δύναμης με το ύψος πτώσης ή ανόδου ενός σώματος φαίνεται ακόμη καλύτερα στη περίπτωση του εκκρεμούς. Στο πρόβλημα αυτό, ο Γαλιλαίος έχει ήδη διατυπώσει ποιοτικά τη συσχέτιση αυτή ισχυριζόμενος ότι ακόμα και αν κάποιος άλλαζε το μήκος του εκκρεμούς κατά τη διάρκεια της κίνησής

του (τοποθετώντας, π.χ., ένα καρφί σ' ένα σημείο του νήματος) το σφαιρίδιο του εκκρεμούς θα έφτανε στο ίδιο ύψος αφού θα είχε πάντοτε την ίδια ορμή (momento). Επίσης, η συσχέτιση της έννοιας της ζωτικής δύναμης με τα μεγέθη βάρος και ύψος αποτελεί βασικό στοιχείο των εργασιών του Leibnitz. Η συσχέτιση αυτή χρησιμοποιείται, εκτός των άλλων για να δείξει ότι η ζωτική δύναμη (και όχι η καρτεσιανή ποσότητα κίνησης) αποτελεί τη θεμελιώδη διατηρητική έννοια (Lindsay, 1975). Η ποσοτική διατύπωση της ιδέας αυτής γίνεται, κυρίως, με γεωμετρικούς συλλογισμούς οι οποίοι, όμως, καθοδηγούνται από γενικότερες φυσικές και φιλοσοφικές αντιλήψεις όπως η αρχή της αδυναμίας κατασκευής αεικίνητου ή αυτή της αναλογίας αιτίου και δράσης που διατύπωσε ο Descartes.

Όσον αφορά στο ποιοτικό περιεχόμενο της έννοιας της ζωτικής δύναμης, είναι προφανές ότι η λέξη δύναμη και εδώ, όπως και στις διατυπώσεις που αφορούσαν τις απλές μηχανές, έχει ενεργειακό χαρακτήρα, δηλαδή πρόκειται για χαρακτηριστική ιδιότητα του κινουμένου σώματος και πήρε αυτή την ονομασία σε αντιδιαστολή με την έννοια της νεκράς δύναμης (*vis mortua*) η οποία χρησιμοποιείτο στη πραγμάτευση προβλημάτων Στατικής και φαίνεται να είχε το Νευτωνικό status. Και στις δύο περιπτώσεις, πάντως, οι λέξεις δύναμη και κίνηση (και άλλες παρεμφερείς όπως η ορμή) κατανοούνται ως ποσότητες που χαρακτηρίζουν το κινούμενο σώμα και που, σε συγκεκριμένα φυσικά προβλήματα διατηρούνται. Τέλος, σε ορισμένα κείμενα που αφορούν μόνο προβλήματα κρούσεων χρησιμοποιούνται εκφράσεις όπως «μεταβίβαση της *vis viva* από ένα σώμα σ' ένα άλλο» που υποδηλώνουν το ενεργειακό περιεχόμενο των εννοιών αυτών.

Λίγο αργότερα, η έννοια της *vis viva* και η διατήρησή της μεταφέρθηκε στο πεδίο της Στατικής όπου έλαβε τη μορφή της αρχής των δυνατών έργων από τον Bernoulli. Σύμφωνα με την σύγχρονη διατύπωση της αρχής αυτής, για ένα σώμα το οποίο βρίσκεται σε ισορροπία, το γινόμενο του συνόλου των δυνάμεων που ασκούνται σ' αυτό επί τις δυνατές μετατοπίσεις τους (το άθροισμα των δυνατών έργων, δηλαδή, στη σύγχρονη επιστημονική γλώσσα) είναι μηδέν. Ο Bernoulli, μάλιστα, σ' ένα γράμμα του στον μαθηματικό Varignon εισάγει την έννοια της ενέργειας για να περιγράψει το γινόμενο δύναμης επί δυνατής μετατόπισης. Πρόκειται, πιθανότατα, για την πρώτη εισαγωγή του όρου 'ενέργεια' που πλησιάζει στην σύγχρονη έννοια του έργου (Lindsay, 1975; Brouzeng, 1980).

Η αρχή των δυνατών έργων καθώς και η αρχή της διατήρησης της ζωτικής δύναμης εμφανίζονται αργότερα σ' ένα διαφορετικό θεωρητικό πλαίσιο, αυτό της μαθηματικής μηχανικής. Στις εργασίες του D' Alembert και άλλων μαθηματικών, οι δύο αυτές αρχές εξάγονται πλέον από άλλες καθαρά μαθηματικές αρχές της Μηχανικής (Brown, 1965) και όχι από παρατηρησιακά δεδομένα, γεωμετρικούς συλλογισμούς ή φιλοσοφικές αρχές. Ο D' Alembert αποσαφηνίζει την έννοια της δύναμης την οποία θεωρεί ένα εξωτερικό αίτιο της κίνησης και επισημαίνει ότι η μεταβολή της ποσότητας κίνησης συνδέεται με το αποτέλεσμα μιας δύναμης στο χρόνο, ενώ η μεταβολή της *vis viva* συνδέεται με το αποτέλεσμα μιας δύναμης στο

χώρο (Lindsay, 1975). Στη τελευταία αυτή θέση, που υποστηρίχθηκε και από άλλους σύγχρονους επιστήμονες, όπως ο Koenig, βρίσκουμε τις ρίζες του σύγχρονου θεωρήματος της μεταβολής της κινητικής ενέργειας. Με τη θέση αυτή, επίσης, εκτός του ότι τίθεται ένα τέλος στη διαμάχη σχετικά με τη φύση και τα χαρακτηριστικά των οντοτήτων 'ποσότητα κίνησης' και 'ζωτική δύναμη' δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για την ανάδειξη της ισοδυναμίας ανάμεσα στο Νευτωνική αντίληψη για τη Μηχανική (η οποία έχει διατυπωθεί σε διανυσματική γλώσσα με προεξάρχουσα την έννοια δύναμης όπως τη γνωρίζουμε σήμερα) και της Μηχανικής που θεμελιώνεται πάνω σε έννοιες όπως η *vis viva* και η διατήρησή της.

Το πλαίσιο της μαθηματικής μηχανικής που θα οδηγήσει τελικά στη διατύπωση ενεργειακών αντιλήψεων, αναπτύσσεται και αποσαφηνίζεται πλήρως στην 'Αναλυτική Μηχανική' του Lagrange ο οποίος χρησιμοποίησε και μετασχημάτισε την ήδη γνωστή αρχή της ελάχιστης δράσης για να καταλήξει σ' ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων, που περιλαμβάνουν και την αρχή διατήρησης της ζωτικής δύναμης κατά Lagrange. Πρέπει να διευκρινίσουμε, ακόμα μια φορά, ότι η αναλυτική προσέγγιση του προβλήματος της κίνησης δεν αφορά πλέον πραγματικά σώματα (αν και εφαρμόζεται τελικά σ' αυτά), αλλά σύστημα σωματιδίων τα οποία σήμερα ονομάζουμε υλικά σημεία. Στην μαθηματική μορφή της, η αρχή διατήρησης της ζωτικής δύναμης κατά Lagrange περιλαμβάνει δύο όρους που αντιστοιχούν στις σύγχρονες έννοιες της κινητικής ενέργειας και της δυναμικής ενέργειας. Το άθροισμα των όρων αυτών είναι μια σταθερά που σήμερα ονομάζουμε ολική μηχανική ενέργεια του μηχανικού συστήματος. Βεβαίως, ο Lagrange δεν χρησιμοποιεί τη σύγχρονη ορολογία για να περιγράψει την εξισωσή του ούτε δείχνει να αντιλαμβάνεται τη σημασία του όρου εκείνου που αντιστοιχεί στην σύγχρονη έννοια της δυναμικής ενέργειας. Το περιεχόμενο αυτών των όρων δεν πρόκειται ν' αποκτήσει τη σύγχρονη σημασία του ούτε με τις εργασίες του Hamilton ο οποίος βελτιώνει τη μαθηματική διατύπωση των νόμων της Μηχανικής (Lindsay, 1975).

Εκτός, όμως, από το θεωρητικό πλαίσιο της Αναλυτικής Μηχανικής το οποίο συνεισφέρει στη διαμόρφωση ενεργειακών εννοιών, υπάρχει και ένα άλλο σύνολο ιδεών, αυτό της Τεχνικής Μηχανικής (Engineering Mechanics), στα πλαίσια του οποίου οικοδομείται, επίσης, μια σαφής ποσοτική σχέση ανάμεσα στη *vis viva* και την έννοια του έργου. Πιο συγκεκριμένα, η ανάγκη να μετρηθεί η απόδοση μιας μηχανής οδήγησε τους Γάλλους μηχανικούς Coriolis, Petit, Poncelet και L. Carnot στη χρησιμοποίηση της έννοιας του μηχανικού έργου που δήλωνε την ολοκλήρωση της δύναμης σε σχέση με την απόσταση. Συγχρόνως, διατυπώθηκε ρητά μια σχέση διατήρησης (σχέση έργου - *vis viva*) η οποία εξέφραζε τη μαθηματική ισότητα του έργου με το μέτρο της *vis viva* που έδιδε η μηχανή (Kuhn, 1959; Brown, 1965). Η έννοια του έργου ως μέτρου της μηχανικής ενέργειας θεμελιώσε μια ποσοτική βάση για τη μελέτη διαδικασιών μετατροπής (Harman, 1994; Kanderakis, 2014; Κανδεράκης, 2021).

Πάντως, η αρχή της διατήρησης της ενέργειας και άλλων ενεργειακών σχέσεων όπως τις αντιλαμβανόμαστε σήμερα, στα πλαίσια της Μηχανικής, δεν πρόκειται

να διατυπωθούν πριν ο Helmholtz συνδέσει ενεργειακές έννοιες προερχόμενες από τον τομέα της θερμότητας με το θεωρητικό πλαίσιο της Μηχανικής.

2.1.2 Οι προ-ενεργειακές έννοιες στα θερμικά φαινόμενα

Η ιστορική εξέλιξη της έννοιας της ενέργειας είναι στενά συνδεδεμένη με το πρόβλημα της φύσης της έννοιας της θερμότητας (Cardwell, 1971; Lindsay, 1975). Δύο μεγάλα ρεύματα ιδεών διαμορφώνονται: (α) αυτό που θεωρεί ότι η θερμότητα είναι ένα είδος αβαρούς ρευστού το οποίο έχει την ιδιότητα να εισέρχεται ή να εξέρχεται από τα διάφορα σώματα ('υλιστική θεωρία') και (β) αυτό που συνδέει τη θερμότητα με την κίνηση των θεμελιωδών σωματιδίων του σώματος ('κινητική θεωρία'). Κάθε ρεύμα συμβάλλει με το δικό του τρόπο στη διαμόρφωση αντιλήψεων που θα οδηγήσουν στη σύγχρονη προσέγγιση για την ενέργεια.

Η υλιστική αντίληψη για τη θερμότητα, αν και συναντάται σε κείμενα του 17ου αιώνα, αποκτά λειτουργικό χαρακτήρα στις εργασίες του Black και του Lavoisier οι οποίοι μελετούν φυσικά φαινόμενα όπως η θερμική ισορροπία και η αλλαγή φυσικής κατάστασης των σωμάτων. Ο Black διαφοροποιεί τις έννοιες 'ένταση θερμότητας' και 'ποσότητα θερμότητας' που αντιστοιχούν στις σύγχρονες έννοιες της θερμοκρασίας και θερμότητας συνδέοντας την θερμοκρασία με τις ενδείξεις του θερμομέτρου και προσδίδοντας στη θερμότητα χαρακτηριστικά ουσίας που περιέχεται στα σώματα και μεταφέρεται πάντοτε από ένα ζεστό σώμα σ' ένα κρύο σώμα (Halbwachs, 1980).

Ο Lavoisier εισάγει τον όρο 'θερμιδικό' (caloric) με τον οποίο καθορίζει ένα ελαστικό ρευστό του οποίου τα σωματίδια απωθούνται μεταξύ τους. Τα σωματίδια αυτά αλληλεπιδρούν με τα σωματίδια της ύλης με αποτέλεσμα να παρατηρούμε τα διάφορα θερμικά φαινόμενα. Το θερμιδικό έχει, επίσης, δύο βασικές ιδιότητες: την προσθετικότητα και την διατήρηση. Η διατήρηση του θερμιδικού αποτελεί μια λειτουργική ιδιότητα με μεγάλη ερμηνευτική ισχύ (Halbwachs, 1980; Elkana, 1974) στα μέσα του 18ου αιώνα. Για παράδειγμα, η διατύπωση της ποσοτικής έκφρασης της θερμοκρασίας που αποκτά ένα υγρό που προήλθε από την ανάμιξη δύο ποσοτήτων με διαφορετική αρχική θερμοκρασία μπορεί να θεωρηθεί ως συνέπεια της διατήρησης του θερμιδικού. Την θεωρία του θερμιδικού χρησιμοποίησε και ο S. Carnot στα πλαίσια της ανάπτυξης μιας θεωρίας των θερμικών μηχανών. Ο S. Carnot υιοθετεί την υδραυλική αναλογία της θερμότητας ως θερμικού ρευστού. Δέχεται, δηλαδή, ότι η κίνηση στην ατμομηχανή πρέπει ν' αποδοθεί στη ροή θερμιδικού, τη μεταφορά του από ένα ζεστό σ' ένα κρύο σώμα, όπως ακριβώς η ροή του νερού κινεί έναν υδροστρόβιλο. Προφανώς, το θερμιδικό διατηρείται αφού πρόκειται για μια ουσία. Βεβαίως, η θεωρία του θερμικού ρευστού θα απορριφθεί τελικώς αλλά, όπως θα δούμε στα επόμενα, τα ίχνη της θα παραμείνουν ακόμα και στα σύγχρονα κείμενα της θερμομετρίας και της θερμοδυναμικής.

Η μη διατήρηση, πάντως, του θερμιδικού σε ορισμένα προβλήματα, όπως αυτό της θέρμανσης των σωμάτων εξ αιτίας της τριβής, φαίνεται να είναι η αιτία που οδηγεί ορισμένους επιστήμονες στην υιοθέτηση της κινητικής αντίληψης για τη

θερμότητα η οποία, και αυτή, είχε παλαιότερες ρίζες σε κείμενα του 17ου αιώνα. Ο B. Thomson (κόμης Rumford) και ο Davy προσπαθούν με πειραματικό τρόπο να ενισχύσουν την κινητική αντίληψη για τη θερμότητα. Σύμφωνα με την αντίληψη αυτή, η φυσική κατάσταση του κρύου ή του ζεστού αποδίδεται σε εσωτερικές κινήσεις της ύλης και πιο συγκεκριμένα στις κινήσεις των μορίων των σωμάτων. Με τον ίδιο τρόπο, ο Thomson ερμηνεύει το γνωστό πείραμά του όπου βράζει νερό από τη θερμότητα που παρήχθη από τη διεύρυνση της κάννης ενός κανονιού με ένα τρυπάνι (Lindsay, 1975; Gillispie, 1986). Η κινητική αντίληψη για τη θερμότητα, σε αντίθεση με την υλιστική αντίληψη, συνδέεται με την έννοια της μετατρεψιμότητας που θα παίξει, μαζί με την έννοια της διατήρησης, κρίσιμο ρόλο στην οικοδόμηση μιας γενικευμένης έννοιας της ενέργειας. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφονται οι συνθέσεις.

Πριν όμως προχωρήσουμε στη περιγραφή των συνθέσεων που επετεύχθησαν ώστε από τις προ-ενεργειακές έννοιες στους τομείς της Μηχανικής και της Θερμότητας να προέλθουν οι αμιγείς ενεργειακές αντιλήψεις του 19ου αιώνα, είναι ενδιαφέρον να αναφέρουμε τη θεωρητική διαπραγμάτευση της μετάδοσης της θερμότητας από τον J. Fourier, στις αρχές του 19ου αιώνα. Πρόκειται για μια καθαρά μαθηματική διαπραγμάτευση, το ίδιο αυστηρή με αυτή της Μηχανικής, όπου δεν υπεισέρχεται καθόλου η φύση της θερμότητας. Η μαθηματική αυτή προσέγγιση της θερμότητας (που συμπυκνώνεται στον γνωστό νόμο ο οποίος αναφέρει ότι η ροή θερμότητας μεταξύ δύο σωμάτων είναι ανάλογη της βαθμίδος θερμοκρασίας ανάμεσα στα δύο σώματα) συνέβαλλε στην ενεργειακή σύνθεση, κυρίως, προς την κατεύθυνση των μη αντιστρεπτών μεταβολών και του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής.

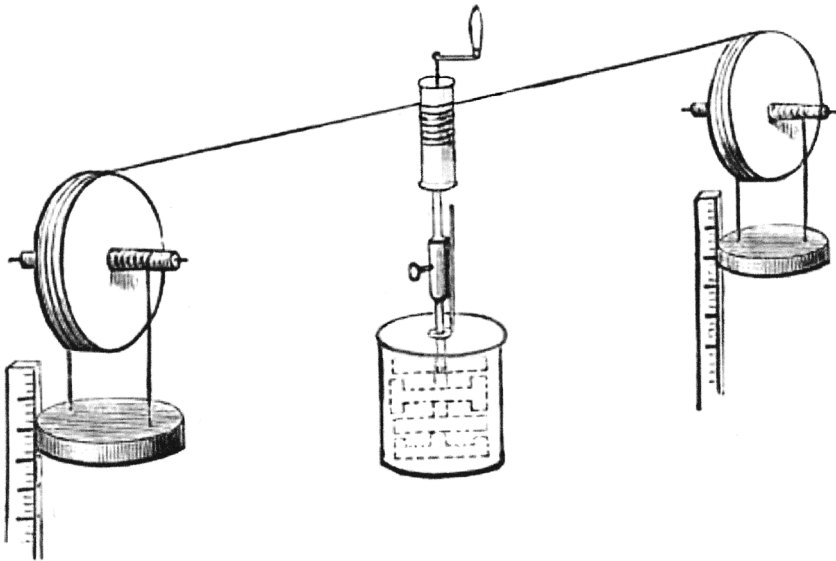
2.2 Η ενεργειακή σύνθεση

2.2.1 Η αρχή της ισοδυναμίας θερμότητας-έργου

Ο Gillispie (1986) ισχυρίζεται ότι η αρχή της διατήρησης της ενέργειας προέκυψε ιστορικά από τη κριτική της έννοιας της θερμότητας ως ουσίας και βασίστηκε στις έμπρακτες αποδείξεις για τη μετατρεψιμότητα της θερμότητας σε 'κινήτριά δύναμη'. Ο Kuhn (1977) υποστηρίζει ότι στις αρχές του 19ου αιώνα μια πληθώρα διαδικασιών μετατρεψιμότητας οδηγεί στην ταυτόχρονη ανακάλυψη της αρχής διατήρησης της ενέργειας από πολλούς επιστήμονες. Θεωρεί, επίσης, ότι ένας άλλος αποφασιστικός παράγων είναι η επίδραση του φιλοσοφικού ρεύματος της Φυσικής Φιλοσοφίας ('Naturphilosophie') σύμφωνα με την οποία θα πρέπει να υπάρχει μια μοναδική, ενοποιητική αρχή για όλα τα φυσικά φαινόμενα. Οι περιπτώσεις του Joule και του Mayer θεωρούνται χαρακτηριστικές την ιστορική περίοδο των ταυτόχρονων ανακαλύψεων (Coelho, 2012, 2013).

Αν και στις αρχές του 19ου αιώνα έχει συσσωρευθεί ένα σύνολο πειραματικών δεδομένων που αφορούν περιπτώσεις μετατρεψιμότητας σε πολλούς τομείς των

φυσικών επιστημών (π.χ., αλληλεπίδραση ηλεκτρισμού και μαγνητισμού με τα πειράματα του Oesterd, πειράματα ηλεκτροχημείας του Becquerel κλπ), η μετατροπή θερμότητας σε μηχανική κίνηση και το αντίθετο αποδεικνύονται οι πλέον γόνιμες περιπτώσεις για την εγκαθίδρυση ποσοτικών σχέσεων διατήρησης. Ο Joule, κάνοντας κριτική στην αντίληψη του S. Carnot περί διατήρησης του θερμικού σε μια θερμική μηχανή, διατείνεται ότι ο ατμός χάνει θερμότητα ακριβώς ανάλογη με τη μηχανική δύναμη που μεταδίδεται στο έμβολο. Πιο συγκεκριμένα, υποστηρίζει ότι μεταφέρεται vis viva από τα σωματίδια του ατμού στο έμβολο. Για να προσδιορίσει ποσοτικά αυτή την ισοδυναμία επινόησε την περίφημη συσκευή (σχήμα 13) που αποτελείτο από ένα μικρό μπρούτζινο πτερυγιοφόρο τροχό ο οποίος περιστρεφόταν μέσα σε νερό¹. Ο τροχός αυτός έμπαινε σε κίνηση όπως ένα εκκρεμές, με τη κάθοδο των βαρών. Μετρώντας, λοιπόν, το μηχανικό έργο που παρήγαγαν τα βαρίδια σε συνδυασμό με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού λόγω της τριβής του με τον τροχό, προσδιόρισε το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας με αρκετή ακρίβεια σε σχέση με την σημερινή αποδεκτή τιμή (Gillispie, 1986). Ο Joule διατύπωσε, λοιπόν, όχι μια γενικευμένη αρχή της διατήρησης της ενέργειας αλλά μια από τις εναλλακτικές μορφές της, την *αρχή της ισοδυναμίας θερμότητας – μηχανικής κίνησης*.



Σχήμα 13. Η συσκευή του Joule για τον προσδιορισμό του μηχανικού ισοδυναμίου της θερμότητας

1. Ένα μοντέλο της συσκευής του Joule έχει κατασκευαστεί στη Fondazione Scienza e Tecnica, στη Φλωρεντία και τη λειτουργία της μπορείτε να βρείτε στην ιστοσελίδα <http://www.youtube.com/watch?v=PThq8fjPLw>.

Η περίπτωση του Mayer είναι, επίσης, ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα διότι καταλήγει σε παρόμοια αποτελέσματα με αυτά του Joule χρησιμοποιώντας ως βάση των συλλογισμών του αντιλήψεις περί αιτιότητας. Πρωταρχικό ρόλο στη διατύπωση της αρχής της ισοδυναμίας θερμότητας -μηχανικής δύναμης ('kraft') παίζει η φιλοσοφική του αντίληψη σύμφωνα με την οποία θα έπρεπε να υπάρχει μια σχέση ταυτότητας ανάμεσα στη θερμότητα και άλλες εκδηλώσεις της φύσης (φυσικές δυνάμεις). Ο ίδιος ο Mayer σημειώνει: «Οι δυνάμεις είναι αιτίες. Σ' αυτές μπορούμε να εφαρμόσουμε κατά γράμμα την αρχή *causa aequat effectum*. Αν η αιτία c έχει το αποτέλεσμα e , τότε $c=e$. Αν, με τη σειρά της η e έχει σαν αποτέλεσμα το f , τότε $e=f$ και συνεπώς $c=e=f=...=e$. Σε μια αιτιακή αλυσίδα τέτοιας μορφής, κανένα μέλος της δεν μπορεί να είναι μηδέν. Αυτή την ιδιότητα που έχουν όλες οι αιτίες την ονομάζουμε αφθαρσία». Και συμπληρώνει: «Οι αιτίες είναι ποσοτικά άφθαρτα και ποιοτικά μετατρέψιμα αντικείμενα» (στο Lindsay, 1975). Ο Mayer προσδιόρισε το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας από τη διαφορά ανάμεσα στην ειδική θερμότητα των αερίων υπό σταθερό όγκο και υπό σταθερή πίεση.

2.2.2 Η ενεργειακή σύνθεση του Helmholtz

Ο Elkana (1974) πιστεύει ότι η έννοια της ενέργειας αποκτά τη σύγχρονη σημασία της μόνο μετά την εγκαθίδρυση της γενικευμένης αρχής διατήρησης της ενέργειας, δηλαδή μετά την σύνδεση που επιχειρεί ο Helmholtz της ιδέας της μετατρεψιμότητας με το θεωρητικό πλαίσιο της Αναλυτικής Μηχανικής. Σύμφωνα με τον Gillispie (1986) το πρόβλημα, όπως το συνέλαβε ο Helmholtz, ήταν να ενσωματωθεί η Ενεργητική (δηλαδή, ότι αφορούσε τη μετατρεψιμότητα των φυσικών δυνάμεων) στην τυπολογία της Μηχανικής, όπου η αρχή διατήρησης αναγνωριζόταν ήδη ως αρχή διατήρησης της *vis viva*. Αυτό σημαίνει ότι με το έργο του Helmholtz περνάμε πλέον από τις συγκεκριμένες περιπτώσεις του Joule και του Mayer στην θεωρητική γενίκευση, στις απαρχές της οικοδόμησης ενός νέου θεωρητικού πλαισίου, αυτού της Θερμοδυναμικής.

Πιο συγκεκριμένα, ο Helmholtz διατυπώνει τη γενική *αρχή της διατήρησης της δύναμης* ('kraft') η οποία αντιστοιχεί περισσότερο στο σύγχρονο θεώρημα μεταβολής της κινητικής ενέργειας. Η αρχή αυτή, στη γενικότερη διατύπωσή της, αφορά ένα σύνολο σημειακών μαζών οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με κεντρικές ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις. «Σε όλες τις περιπτώσεις κίνησης υλικών σημείων υπό την επίδραση των ελκτικών και απωθητικών δυνάμεών τους, η ένταση των οποίων εξαρτάται μόνο απ' την απόσταση», γράφει ο Helmholtz, «η ελάττωση των δυνάμεων τάσης (η έννοια αυτή θα μπορούσε ν' αντιστοιχηθεί στη σύγχρονη έννοια της δυναμικής ενέργειας) είναι πάντα ίση με την προσάυξηση της *vis viva* (η έννοια αυτή θα μπορούσε ν' αντιστοιχηθεί στη σύγχρονη έννοια της κινητικής ενέργειας). Και αντίστροφα, η αύξηση των πρώτων είναι ίση με την ελάττωση της δεύτερης. Με άλλα λόγια το άθροισμα των δυνάμεων τάσεως και της *vis viva* παραμένει πάντα σταθερό. Σ' αυτή τη γενικότερη μορφή της, μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τη πρότασή μας νόμο της διατήρησης της δύναμης (kraft)»

(Gillispie, 1986, σελ. 357). Η πιο ενδιαφέρουσα, όμως, πτυχή του έργου του Helmholtz αφορά στην εφαρμογή της αρχής αυτής σε μια πληθώρα φυσικών καταστάσεων όπου παρατηρούνται φαινόμενα μετατρεψιμότητας. Εφαρμόζει, λοιπόν, την αρχή του σε φαινόμενα όπου εκ πρώτης όψεως φαίνεται ότι η *vis viva* χάνεται (πλαστική σύγκρουση σωμάτων και φαινόμενα όπου υπάρχει τριβή) και αποδεικνύει ότι η απώλεια αυτή ισοδυναμεί με μια ποσότητα θερμότητας αποδίδοντας στη θερμότητα το *status* ενός μεγέθους ισοδυνάμου με τα θεωρητικά μεγέθη της Αναλυτικής Μηχανικής. Συγχρόνως, απορρίπτει την θεωρία του θερμικού αφού «μια ποσότητα θερμότητας αποτελεί έκφραση κατ' αρχήν της ποσότητας *vis viva* της θερμικής κίνησης και κατά δεύτερον των δυνάμεων τάσεων των ατόμων» (Lindsay, 1976). Τέλος, ο Helmholtz εφάρμοσε την αρχή του και σε άλλες καταστάσεις μετατρεψιμότητας αναδεικνύοντας την ισοδυναμία της μηχανικής δύναμης με χημικές, ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις. «Η προσαρμοστικότητα της έννοιας του δυναμικού στην ενεργητική», γράφει ο Gillispie, «φανερώσει τη σημασία που αποκτούσε ο ηλεκτρισμός σ' ολόκληρη τη φυσική. ... Σε όλες τις περιπτώσεις [στατικός και γαλβανικός ηλεκτρισμός], ο Helmholtz ισοσκέλιζε τη θερμότητα που παράγεται από τα ρεύματα με το μηχανικό της ισοδύναμο και σύγκρινε τη χημική και την ηλεκτρική ενέργεια παίρνοντας ως σημείο αναφοράς τα θερμικά ισοδυνάμα τους» (Gillispie, 1986, σελ. 358-359).

2.2.3 Ο πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής

Παράλληλα με την ενεργειακή σύνθεση που επιτυγχάνει ο Helmholtz, κύριο χαρακτηριστικό της οποίας είναι η περιβολή της επιστήμης της Θερμότητας με το κύρος της Μηχανικής, εξελίσσεται ένα άλλο ρεύμα σκέψης, που αφορά τη μελέτη των θερμικών μηχανών, και το οποίο θα οδηγήσει στη διαμόρφωση των θεωρητικών πλαισίων της Θερμοδυναμικής (με τις εργασίες κυρίως των W. Thomson - λόρδου Kelvin, Clausius και Rankine) και της Στατιστικής Μηχανικής (με τις εργασίες κυρίως των Gibbs, Boltzmann και Maxwell).

Δύο είναι οι βασικοί άξονες του έργου του Clausius που ενδιαφέρουν στη διαμόρφωση ενεργειακών εννοιών. Ο πρώτος άξονας αφορά στη διατύπωση μορφών του πρώτου νόμου της Θερμοδυναμικής σε προβλήματα λειτουργίας θερμικών μηχανών και θέρμανσης ιδανικών αερίων. Ο δεύτερος άξονας αφορά στην διαμόρφωση της καινούργιας έννοιας της εντροπίας που οδήγησε σε διατυπώσεις του δεύτερου νόμου της Θερμοδυναμικής και ουσιαστικά αποτέλεσε το σημείο ρήξης του καινούργιου θεωρητικού πλαισίου μ' αυτό της Μηχανικής.

Στο πρόβλημα της λειτουργίας μιας θερμικής μηχανής ο Clausius έδειξε ότι «κατά την παραγωγή έργου μπορεί κάλλιστα να καταναλώνεται μια ορισμένη ποσότητα θερμότητας και ταυτόχρονα μια άλλη ποσότητα να μεταβιβάζεται από ένα θερμότερο σώμα σ' ένα ψυχρότερο σώμα, και οι δύο ποσότητες θερμότητας να έχουν καθορισμένη σχέση με το έργο που παράγεται» (Gillispie, 1986, σελ. 362). Αξίζει να παρατηρήσει κανείς ότι στη διατύπωση του Clausius συνυπάρχει η έννοια της μετατρεψιμότητας (μετατροπή θερμότητας σε έργο) με την έννοια της μετα-

φοράς θερμότητας (από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας σ' ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας), δηλαδή, επιτυγχάνεται ένας συμβιβασμός ανάμεσα σε στοιχεία της θεωρίας του S. Carnot περί ροής θερμιδικού και της μηχανικής θεωρίας της θερμότητας. Η έννοια της μεταφοράς θερμότητας πρόκειται να ενταχθεί στο λεξιλόγιο του υπό διαμόρφωση νέου θεωρητικού πλαισίου της θερμοδυναμικής χωρίς, βεβαίως, να αναφέρεται σε ροή του θερμιδικού.

Μια δεύτερη διατύπωση του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής συναντάμε κατά τη διάρκεια της πραγμάτευσης του προβλήματος της θέρμανσης ενός αερίου που έχει ως αποτέλεσμα τη διαστολή του. Ερμηνεύοντας τη διαφορική εξίσωση στην οποία κατέληξε, ο Clausius γράφει ότι «η συνολική ποσότητα θερμότητας που ελήφθη από το αέριο, κατά τη διάρκεια της αλλαγής του όγκου του και της θερμοκρασίας του μπορεί να διαχωρισθεί σε δύο μέρη: σ' αυτό που περιέχει την ελεύθερη θερμότητα και παριστάνεται στη διαφορική εξίσωση με τον παράγοντα U και σ' αυτόν που παριστάνει τη θερμότητα που καταναλώθηκε ώστε να παραχθεί έργο» (Lindsay, 1976). Στη διατύπωση αυτή εμπεριέχεται, αν και δεν κατονομάζεται, η έννοια της εσωτερικής ενέργειας (παράγων U) η οποία θα συμβάλλει στην τελική γενίκευση του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής.

Ο W. Thomson ορίζει, επίσης, με ανάλογο τρόπο τον παράγοντα αυτόν (τον οποίο ονομάζει μεταβολή της μηχανικής ενέργειας) ως τη διαφορά ανάμεσα στην ποσότητα της θερμότητας που προσδίδεται σ' ένα ρευστό και στο έργο που παράγεται. Ουσιαστικά, όμως, πρόκειται για τον σύγχρονο ορισμό της έννοιας της ενέργειας αν αφαιρέσουμε το λανθασμένο επίθετο 'μηχανική'. Την ίδια περίπου εποχή, ο Rankine θα ορίσει την έννοια της ενέργειας ως την παντοειδή ικανότητα ενός συστήματος να παράγει έργο. Πρόκειται, πάντως, για έναν λανθασμένο ορισμό που τον συναντάμε συχνότατα στα σύγχρονα σχολικά συγγράμματα. Ο Brunhes (1909), σ' ένα εκλαϊκευτικό του σύγγραμμα, μισόν αιώνα μετά τις δημοσιεύσεις των W. Thomson και Rankine, θα επισημάνει τις εννοιολογικές ασάφειες που κυριαρχούν ακόμα στην εποχή του και θα περιγράψει τις προσπάθειες διάκρισης ανάμεσα στον ορισμό του W. Thomson και αυτόν του Rankine αποδίδοντας στον τελευταίο τις ιδιότητες της σύγχρονης έννοιας της ελεύθερης ενέργειας. Ο Rankine θα ορίσει, επίσης, την έννοια της δυναμικής ενέργειας μέσα από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων και θα διατυπώσει τον δικό του νόμο διατήρησης (τον οποίο ονομάζει νόμο του μετασχηματισμού της ενέργειας) ως εξής: το άθροισμα της πραγματικής (κινητικής) ενέργειας και της δυναμικής ενέργειας στο σύμπαν παραμένει αμετάβλητο.

Με το έργο των W. Thomson και Rankine γίνεται προσπάθεια ν' αναπτυχθεί μια γενική θεωρία της ενεργειακής φυσικής διαχωρισμένη από εικασίες περί της φύσης της ύλης και η οποία θα βασίζεται σ' ένα πλαίσιο αξιωμάτων όπως αυτό της διατήρησης της ενέργειας (Harman, 1994). Η προσπάθεια αυτή θα συνεχισθεί και θα οδηγήσει στις εργασίες των Poincaré και Planck οι οποίοι θεμελίωσαν το σύγχρονο θεωρητικό πλαίσιο της μακροσκοπικής θερμοδυναμικής σ' ένα απόλυτα καθορισμένο σύστημα φυσικών μεγεθών που μπορούν να μετρηθούν μακροσκοπικά (Baher, 1978).

Στα τέλη, λοιπόν, του 19ου και στις αρχές του 20ου αιώνα θα διαμορφωθούν τρία ισοδύναμα θεωρητικά πλαίσια που αφορούν μηχανικά και θερμικά φαινόμενα, και στα οποία εμπλέκεται η έννοια της ενέργειας: (α) το πλαίσιο της Μηχανικής εμπλουτισμένο, βεβαίως, με τις ιδέες της ενεργειακής σύνθεσης του 19ου αιώνα, με προνομιακό πεδίο εφαρμογών τα μηχανικά φαινόμενα, (β) το πλαίσιο της μακροσκοπικής Θερμοδυναμικής στο οποίο η έννοια της ενέργειας αποκτά ενοποιητική και δια-φαινομενολογική αξία και (γ) το πλαίσιο της Στατιστικής Μηχανικής που αναφέρεται στην μικροσκοπική διαπραγμάτευση των ιδίων φαινομένων που συναντάμε στη μακροσκοπική Θερμοδυναμική, ενώ, αποτελεί συγχρόνως και μια γέφυρα ανάμεσα στα δύο πρώτα πλαίσια. Ο Planck, στον πρόλογο της 'Θερμοδυναμικής' του, αποδίδει με περιεκτικό και σαφή τρόπο τα χαρακτηριστικά τους και κάνει μνεία της ιστορικής τους προέλευσης ως εξής: «Σχετικά με την ανάπτυξη της Θερμοδυναμικής μπορούμε να διακρίνουμε τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις ή μεθόδους έρευνας. Η πρώτη προσπαθεί να ψάξει πιο βαθιά μέσα στη φύση των φαινομένων. Σύμφωνα μ' αυτή, η θερμότητα οφείλεται σε καθορισμένες κινήσεις χημικών μορίων και ατόμων διακριτής μάζας. Μετά την εγκαθίδρυσή της από τους Joule, Waterstone, Kroning και Clausius, αυτή η κινητική θεωρία διευρύνθηκε ουσιαστικά από τους Maxwell και Boltzmann. Παρ' όλα αυτά στην πλέον πρόσφατη ανάπτυξη της φαίνεται ν' αντιμετωπίζει σχεδόν αξεπέραστα εμπόδια που οφείλονται όχι μόνο στις μαθηματικές δυσκολίες αλλά, κυρίως, σε δυσκολίες που συνδέονται με την μηχανική ερμηνεία των αρχών της Θερμοδυναμικής. Η δεύτερη μέθοδος ανάπτυξης της Θερμοδυναμικής, που οφείλεται στον Helmholtz, αποφεύγει δυσκολίες όπως αυτές που αναφέραμε προηγουμένως. Περιορίζεται στη σπουδαιότερη υπόθεση της μηχανικής θεωρίας της θερμότητας, δηλαδή, στο ότι η θερμότητα οφείλεται στη κίνηση, αλλά χωρίς την πρόθεση να συγκεκριμενοποιηθεί η φύση αυτής της κίνησης. Η άποψη αυτή ναι μεν διασώζει την φιλοσοφική ικανοποίηση που παρέχει η μηχανική θεωρία των φυσικών φαινομένων αλλά η [θεωρητική] βάση που προσφέρει δεν φαίνεται μέχρι τώρα να επιτρέπει την οικοδόμηση μιας πλήρους και λεπτομερούς θεωρίας. Ότι έχουμε πάρει από την προσέγγιση του Helmholtz και μετά συνίσταται απλά στην επιβεβαίωση ορισμένων γενικών νόμων οι οποίοι ήδη έχουν αποδειχθεί πειραματικά. Υπάρχει και μια τρίτη προσέγγιση της Θερμοδυναμικής που ως τώρα έχει αποδειχθεί η πλέον γόνιμη. Διαφοροποιείται από τις δύο προηγούμενες από το γεγονός ότι δεν τοποθετεί τη μηχανική φύση της θερμότητας στο προσκήνιο αλλά, μάλλον, απέχει από το να διατυπώσει κάποια υπόθεση για την συγκεκριμένη φύση της θερμότητας και θεμελιώνεται σε ορισμένα γενικά πειραματικά δεδομένα όπως οι δύο σπουδαίοι νόμοι ή αρχές της Θερμοδυναμικής. Απ' αυτές, είναι δυνατόν να εξαχθεί με λογικό τρόπο ένα πλήθος νέων νόμων της φυσικής και της χημείας που έχουν ευρεία εφαρμογή χωρίς σοβαρές εξαιρέσεις» (Lindsay, 1976, σελ. 412-413).

Η σχέση ανάμεσα στους νόμους της Θερμοδυναμικής με τη στατιστική θεωρία των μοριακών κινήσεων παρέμεινε ζήτημα διαμάχης και μετά το τέλος του 19^{ου}

αιώνα. Ο Gibbs, ο οποίος συνέβαλλε ουσιαστικά στην ανάπτυξη της στατιστικής θερμοδυναμικής, διατυπώνει την άποψη ότι υπάρχει διαφορά ανάμεσα, από τη μια μεριά, στη διαμόρφωση υποθέσεων σχετικά με τη μοριακή δράση και τη σύσταση των υλικών σωμάτων και, από την άλλη μεριά, στη διατύπωση των νόμων της θερμοδυναμικής (Gibbs, 1902, p. viii). Η πρόταση του Gibbs ίσως συνιστά έναν έντιμο συμβιβασμό στην ‘αντιπαράθεση’ μεταξύ των δύο προσεγγίσεων της θερμοδυναμικής (Harman, 1994).

2.3 Μερικά συμπεράσματα

Στον πίνακα 2, παραθέτουμε μια σχηματική χρονολογική παράσταση των εννοιολογικών ιστορικών περιόδων που θεωρούμε σημαντικές στην εξέλιξη της έννοιας της ενέργειας. Ένα βασικό συμπέρασμα που συνάγεται από την ιστοριογραφική μελέτη είναι ότι η πορεία οικοδόμησης της έννοιας της ενέργειας συνιστά μια παράλληλη πορεία γενικεύσεων και διαφοροποιήσεων. Συνήθως, τονίζεται μόνο η πρώτη διάσταση, δηλαδή ο *ενοποιητικός* και *δια-φαινομενολογικός* χαρακτήρας της ενέργειας που απορρέει από τη διαδικασία οικοδόμησης της αρχής διατήρησης της ενέργειας. Η αρχή αυτή, όμως, δεν είναι ενιαία, όπως επιβεβαιώνεται άλλωστε και από την ανάλυση των συγγραμμάτων αναφοράς, αφού παρουσιάζεται με διαφορετικές μορφές κάθε μια από τις οποίες φαίνεται να λειτουργεί με σχετική *εννοιολογική αυτονομία* ως προς τις άλλες. Η σχετική αυτή εννοιολογική αυτονομία θεμελιώνεται στο διαφορετικό συστημικό και εμπειρικό περιεχόμενο που αποκτά η έννοια στα πλαίσια κάθε μορφής διατήρησης, καθώς και στο ότι σε κάθε μορφή διατήρησης μπορεί να αντιστοιχήσει κάποιος ένα *προνομιακό* φαινομενολογικό πεδίο εφαρμογής της.

Η πορεία προς τη γενίκευση, σύμφωνα με την ιστοριογραφική μελέτη, μπορεί να έχει τρεις διαφορετικές αφητηρίες οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα ή όχι. Στη βάση, λοιπόν, της οικοδόμησης της αρχής διατήρησης, μπορεί να υπάρχουν φιλοσοφικές, μαθηματικές ή πειραματικές αναζητήσεις. Το φιλοσοφικό επιχείρημα στηρίζεται στις έννοιες της *ταυτότητας* και της *αιτιότητας* και βρίσκεται στη βάση των συλλογισμών πολλών επιστημόνων που προσέγγισαν την αρχή διατήρησης, όπως των Leibnitz, Descartes, Mayer και Joule. Στο ίδιο άλλωστε συμπέρασμα καταλήγουμε και από τη μεριά της Γενετικής Επιστημολογίας. Για μερικούς απ’ αυτούς τους επιστήμονες (π.χ., για τον Joule), το φιλοσοφικό επιχείρημα είναι υπονοούμενο και η προσπάθεια οικοδόμησης της αρχής διατήρησης γίνεται με τη βοήθεια πειραματικών διαδικασιών. Η παράλληλη προσφυγή στα δεδομένα της εμπειρίας οδηγεί, επίσης, στη διατύπωση προ-ενεργειακών αντιλήψεων όπως η διαπίστωση ότι το γινόμενο βάρους επί ύψους παραμένει σταθερό. Τέλος, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αξιωματικής θεμελίωσης μιας μαθηματικής θεωρίας, η αρχή διατήρησης της ενέργειας προκύπτει ως *μαθηματική οντότητα* και όχι ως φυσική αναγκαιότητα (π.χ., προσεγγίσεις Lagrange και Poincaré).

Τόσο, όμως, στην ιστοριογραφική μελέτη όσο και στην επιστημολογική ανά-