

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας και οι απαρχές της θερμοδυναμικής. Ιστορικά και Ιστοριογραφικά ζητήματα.

Ακολουθώντας τις σύγχρονες ιστοριογραφικές τάσεις, το παρόν κείμενο σκοπεύει σε μια σύντομη επισκόπηση των κυριότερων επεισοδίων της ιστορίας της θερμοδυναμικής, όπως αυτά εκτυλίχτηκαν σε διάφορα πολιτισμικά πλαίσια.

Η ιστορία της επιστήμης της ενέργειας και της θερμοδυναμικής ωθεί τον ιστορικό να μελετήσει μια ενδιαφέρουσα σύγκλιση επιστημονικών και τεχνολογικών πρακτικών στον απόηχο της πρώτης βιομηχανικής επανάστασης (τέλη 18^{ου} με αρχές 19^{ου} αιώνα), αποτελώντας έτσι ένα προνομιακό πεδίο για την εξέταση της σχέσης μεταξύ επιστημονικής πρακτικής και τεχνολογίας. Ωστόσο, η έννοια της ενέργειας κατά τον 19^ο αιώνα είναι στενά συνδεδεμένη όχι μόνο με την τεχνολογία των θερμικών μηχανών, τις διάφορες θεωρίες περί θερμότητας και τη θερμομετρία αλλά και με τα κοινωνικά, οικονομικά και ιδεολογικά χαρακτηριστικά των ανερχόμενων βιομηχανικών κοινωνιών.

Το 1959 ο Thomas Kuhn στο άρθρο του «Η διατήρησης της ενέργειας σαν ένα παράδειγμα ταυτόχρονης ανακάλυψης» ανέδειξε δώδεκα άτομα που δημοσιοποίησαν, ο καθένας με το δικό του τρόπο, την *αρχή διατήρησης της ενέργειας*. Με τον εντοπισμό τριών παραγόντων που έκαναν δυνατή την «ταυτόχρονη ανακάλυψη» της αρχής διατήρησης της ενέργειας («η διαθεσιμότητα των διαδικασιών μετατροπής», «το ενδιαφέρον για τις μηχανές», «η Naturphilosophie»¹), ο Kuhn επιχείρησε να εντάξει την θερμοδυναμική στο ευρύτερο διανοητικό και πολιτισμικό πλαίσιο του 19^{ου} αιώνα. Για τον ιστορικό της επιστήμης αυτό είναι μια συνεχής πρόκληση: να υπερβαίνει τους περιορισμούς της βιογραφικής προσέγγισης χωρίς να παραβλέπει τις ιδιαιτερότητες των προσώπων. Πιο πρόσφατα, ο Crosbie Smith επεξέτεινε τη βιογραφική προσέγγιση, θεωρώντας την επιστημονική εργασία όχι ως το προϊόν εργασίας μεμονωμένων ατόμων αλλά ως εξαρτώμενης των πολιτισμικών στοιχείων της εποχής κατά την οποία παράγεται (Smith, 1998). Ο Smith έριξε νέο φως στην εμφάνιση της επιστήμης της ενέργειας μέσα στο πολιτισμικό πλαίσιο μια ομάδας Βρετανών επιστημόνων και μηχανικών που χαρακτηριζόταν από την αυξανόμενη χρήση βιομηχανικών μηχανών, τα υπάρχοντα κοινωνικά και θεσμικά

¹ Naturphilosophie: ρεύμα που ανήκει στη φιλοσοφική παράδοση του Γερμανικού Ιδεαλισμού του 19ου αιώνα. Διαμορφώθηκε ενάντια στην μηχανοκρατική ερμηνεία της φύσης που κυριαρχούσε εκείνη την εποχή, και χαρακτηρίζεται από τη θεώρηση της φύσης ως οργανικό και έλλογο όλο. Σκοπός του φιλοσοφικού ρεύματος αυτού, δεν είναι η καταγραφή και η αιτιακή ερμηνεία της φύσης, αλλά η κατανόηση της σημασίας των επιμέρους εκφάνσεών της με σκοπό τη συνολική αντίληψη της φύσης, ως οργανισμός που διέπεται από σκοπιμότητα.

δίκτυα, και τις πολιτικές και θρησκευτικές ιδεολογίες. Κατά τον Smith η έννοια της ενέργειας ήταν μια βαθύτατα βρετανική κατασκευή.

Ωστόσο, ο χαρακτηρισμός του «βρετανικού χαρακτήρα» της επιστήμης της ενέργειας από τον Smith δεν οδηγεί απαραίτητα στην υιοθέτηση της άποψης περί ύπαρξης εθνικών σχολών στην προσέγγιση ενός γνωστικού πεδίου. Συζητήσεις για την ύπαρξη εθνικών σχολών, και αντίστοιχων επιστημολογικών στάσεων, εμφανίζονται για πρώτη φορά σε έργα των αρχών του 20^{ου} αιώνα, κυρίως του J.T. Merz και του P. Duhem. Η έννοια των εθνικών σχολών σκοπεύει στη συγκλιση στοιχείων που φαίνεται να χαρακτηρίζουν ολόκληρη την επιστημονική παραγωγή μιας χώρας. Ωστόσο η προσέγγιση αυτή, όσο κι αν διευκολύνει τις συγκριτικές μελέτες, παραγνωρίζει την ύπαρξη διαφορετικών επιστημονικών πρακτικών οι οποίες εξαρτώνται από διαφορετικές τοπικές συνθήκες. Ορισμένες αξίες που διαμορφώνουν την επιστημονική πρακτική προέρχονται από συγκεκριμένους πολιτισμικούς χώρους, συχνά μικρότερης κλίμακας από αυτόν που ορίζουν όσοι εργάζονται σε ένα συγκεκριμένο γνωστικό πεδίο σε μία συγκεκριμένη χώρα. Η επιστημονική πρακτική που ασκείται, για παράδειγμα, σε διαφορετικά εργαστήρια φυσικής μπορεί να χαρακτηρίζεται από την υιοθέτηση διαφορετικών συστημάτων αξιών και κανόνων, και από διαφορετικές δεσμεύσεις όσον αφορά στη χρήση θεωρητικών εννοιών, υπολογιστικών μεθόδων, και πειραματικών οργάνων. (Gavroglu, 1994) Έτσι και στην περίπτωση της θερμοδυναμικής, θα ήταν πιθανώς απλουστευτικό να κάνουμε λόγο για διαφορετικές εθνικές σχολές (πχ. την βρετανική και την γαλλική), καθώς η ιστορική έρευνα έχει αναδείξει διαφορετικές προσεγγίσεις της θεωρίας από διαφορετικές ομάδες επιστημόνων και μηχανικών της ίδιας χώρας. (Papanelopoulou, 2006). Όπως θα δούμε παρακάτω, οι διαφορές που παρατηρούνται στους τρόπους με τους οποίους οι πρωταγωνιστές της θερμοδυναμικής έβλεπαν και χειρίζονταν τη νέα επιστήμη οφείλονται στο ότι η θερμοδυναμική αναπτύχθηκε από πρόσωπα που προέρχονταν όχι μόνο από διαφορετικές χώρες, αλλά και από διαφορετικές παραδόσεις και διαφορετικά πολιτισμικά πλαίσια.

Καταλυτικό ρόλο στην εκβιομηχάνιση της Μεγάλης Βρετανίας, της Γαλλίας και της Γερμανίας κατά τα τέλη του 18ου αιώνα και τις αρχές του 19ου αιώνα έπαιξε η ατμομηχανή. Οι πρώτες ατμομηχανές που χρησιμοποιήθηκαν στη Βρετανική βιομηχανία, κατά τις πρώτες δεκαετίες του 18^{ου} αιώνα, ήταν αυτές του Thomas Savery και του Thomas Newcomen, με τις οποίες αντλούνταν τα νερά από τις στοές των ορυχείων. Χάρη στις καινοτομίες που εισήγαγε ο Σκώτος μηχανικός James Watt (1736-1819), η χρήση της ισχύος του ατμού άρχισε να εξαπλώνεται σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς (Cardwell, 2000). Παράλληλα οι καινοτομίες αυτές προκάλεσαν το ενδιαφέρον των φυσικών φιλοσόφων (δηλ. των

επιστημόνων όπως ονομάζονταν ακόμη τότε) ως προς τις αρχές λειτουργίας των μηχανών, και κατ' επέκταση λειτούργησαν ως ένα νομιμοποιητικό πλαίσιο για τον ρόλο των φυσικών στην νέα βιομηχανική κοινωνία καθώς οι έρευνες τους είχαν καταφανή πρακτική ωφέλεια και συνάδαν με τις νεοδημιουργηθείσες ανάγκες της εκβιομηχάνισης. Αναμφισβήτητα, η Μεγάλη Βρετανία υπήρξε ο μεγάλος πρωτοπόρος της λεγόμενης βιομηχανικής επανάστασης και οι ατμομηχανές μετατράπηκαν σε έμβλημα της οικονομικής κυριαρχίας της. Για τους εχθρούς και τους οικονομικούς ανταγωνιστές της, η τιθάσευση της ισχύος του ατμού θα μπορούσε να μεταφραστεί σε ανταγωνισμό επί ίσοις, πλέον, όροις με τη Μεγάλη Βρετανία.

Στη Γαλλία, αντίθετα, μέχρι το 1815, το ενδιαφέρον για τις ατμομηχανές ήταν περιορισμένο. Σε σύγκριση με τις περίπου 5000 μηχανές που υπήρχαν στην Μεγάλη Βρετανία, η Γαλλία είχε περίπου 200, οι περισσότερες εκ των οποίων ήταν παλαιάς τεχνολογίας και δεν παρουσίαζαν κανένα πραγματικό όφελος έναντι των υδραυλικών μηχανών. Ωστόσο, με το τέλος των Ναπολεόντειων πολέμων, και την έλευση της βασιλικής οικογένειας των Βουρβόνων το 1814-15 η Γαλλία επανέκτησε τις επαφές της με τα άλλα Ευρωπαϊκά κράτη.

Σε αντίθεση με τη Μεγάλη Βρετανία, οι διάφορες μελέτες Γάλλων μηχανικών πάνω στη λειτουργία των ατμομηχανών λάμβαναν χώρα κυρίως σε ακαδημαϊκά πλαίσια. Το εκπαιδευτικό σύστημα της Γαλλίας, κυρίως μετά τις μεταρρυθμίσεις που επέβαλε η Επανάσταση του 1789, είχε ως στόχο την κατάρτιση ικανών μηχανικών που θα προσέφεραν τις υπηρεσίες τους στο κράτος. Καθ' όλη τη διάρκεια του 19^{ου} αιώνα, στη Γαλλία, ο όρος 'μηχανικός' αναφερόταν σε άτομα που είχαν φοιτήσει αρχικά στην στρατιωτική Πολυτεχνική Σχολή του Παρισιού, και έπειτα σε κάποια σχολή εφηρμοσμένης μηχανικής προκειμένου να ανταποκριθούν στις διοικητικές, οικονομικές και στρατιωτικές ανάγκες του κράτους. Τα καθήκοντα των μηχανικών ήταν κυρίως διοικητικά και τεχνικά. Η άσκηση τεχνικής ανερχόταν σε εφαρμογές αρχών της μηχανικής και των μαθηματικών σε προβλήματα που αφορούσαν τα μεταλλεία, το πυροβολικό, την κατασκευή δρόμων, γεφυρών, σιδηροδρομικών γραμμών κτλ. Ωστόσο η έρευνα δεν απουσίαζε από τα διάφορα τεχνολογικά ιδρύματα, και ιδίως οι μελέτες που είχαν ως στόχο να δώσουν στέρεη θεωρητική βάση σε προβλήματα μηχανικής. Από το 1815 και έπειτα, με την αποκατάσταση της ειρήνης στην Ευρώπη, η μελέτη και προσπάθεια βελτίωσης της απόδοσης των ατμομηχανών ήταν μία από τις καίριες ασχολίες των Γάλλων μηχανικών που επιθυμούσαν να καταστήσουν την γαλλική βιομηχανία το ίδιο ανταγωνιστική με την βρετανική.

Ο Sadi Carnot (1796-1832), γιος ενός από τους πρωταγωνιστές της γαλλικής Επανάστασης, του Lazare Carnot (1753-1823), υπήρξε καρπός μιας τέτοιας εκπαίδευσης, αν

και στη συνέχεια απομακρύνθηκε από τις όποιες υποχρεώσεις του ως μέλος του σώματος των στρατιωτικών μηχανικών. Ο Lazare Carnot, εκτός από τη συμμετοχή του στην Γαλλική Επανάσταση και τις διοικητικές υπηρεσίες του κατά τη Ναπολεόντεια περίοδο, υπήρξε μηχανικός απόφοιτος της σχολής Mézières. Συμμετείχε στην αναδιοργάνωση της γαλλικής εκπαίδευσης, και πρότεινε την επανίδρυση της σχολής Mézières στην πόλη Metz, η οποία, με την ίδρυση της Πολυτεχνικής σχολής του Παρισιού, αποτέλεσε μια από τις κύριες σχολές εφαρμοσμένης μηχανικής. Σημαντική ήταν η συνεισφορά του Lazare Carnot στη θεωρία των μηχανών και στη μηχανική. Μελέτησε την εφαρμογή της αρχής της vis viva («ζώσας δύναμης»)² στην λειτουργία υδραυλικών μηχανών, με σκοπό να καθορίσει τις συνθήκες της βέλτιστης λειτουργίας τους οι οποίες, υποστήριξε, ότι επιτυγχάνονται όταν το νερό εισέρχεται στη μηχανή χωρίς κρούση και εξέρχεται με μηδαμινή ταχύτητα. Η επιρροή του Lazare Carnot στο έργο του γιού του Sadi είναι εμφανής.

Η δημοσίευση της πραγματείας του Sadi Carnot, «Σκέψεις για την κινητήρια δύναμη της φωτιάς», το 1824, συχνά αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως το σημείο έναρξης της ιστορίας της θερμοδυναμικής. Ο κύριος σκοπός του Carnot ήταν να καθορίσει τις συνθήκες υπό τις οποίες θα επιτυγχανόταν η πιο οικονομική χρήση της θερμότητας για την παραγωγή κινητήριας δύναμης. Στην πραγματεία αυτή ο Carnot εξέτασε αν υπήρχε όριο στην κινητήρια δύναμη που μπορούσαν να παράγουν οι ατμομηχανές, καθώς και το κατά πόσο ο ατμός ήταν το αποτελεσματικότερο μέσο παραγωγής κινητήριας δύναμης. Η μελέτη του αφορούσε μια ιδανική μηχανή (χωρίς άσκοπες απώλειες θερμότητας), που αποτελούνταν από μια δεξαμενή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας, μια δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας και έναν κύλινδρο με έμβολο γεμάτος με αέριο. Το αέριο υφίστατο διάφορες μεταβολές παίρνοντας θερμότητα από την θερμή δεξαμενή, δίνοντας θερμότητα στην ψυχρή δεξαμενή και παράγοντας κινητήρια δύναμη. Η διαδικασία ήταν κυκλική, και το αέριο επανερχόταν πάντα στην αρχική του κατάσταση.

Σύμφωνα με τον Carnot η κινητήρια δύναμη (ή το «μηχανικό έργο» - βλ. παραπάνω) παράγεται από τη ροή θερμότητας από τη θερμή στην ψυχρή δεξαμενή. Το συμπέρασμά του αυτό αποτελεί μια διατύπωση του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής, που εμφανίστηκε πριν από τον πρώτο νόμο. Ο Carnot πίστευε στην, διαδεδομένη για την εποχή, άποψη ότι η θερμότητα ήταν μια ουσία, ένα αβαρές ρευστό (caloric) που διατηρούνταν και μεταφερόταν από θερμότερα σε λιγότερο θερμά μέρη.³ Η θερμική μηχανή του Carnot λειτουργούσε όπως

² Η vis viva ισούται με το γινόμενο της μάζας επί το τετράγωνο της ταχύτητας.

³ Η έννοια των «αβαρών ρευστών» που απαντάνται κυρίως κατά τον 18^ο αιώνα ήταν ένα απαραίτητο βοήθημα στη διαδικασία ποσοτικοποίησης της φύσης από την πειραματική φυσική.

μια υδροκίνητη μηχανή, στην οποία τη θέση του νερού έπαιρνε η θερμότητα. Η μηχανή του Carnot ήταν αντιστρεπτή, μπορούσε δηλαδή να απορροφήσει θερμότητα από την ψυχρή δεξαμενή και να τη μεταφέρει στη θερμή αλλά με την κατανάλωση κινητήριας δύναμης. Με βάση την αντιστρεψιμότητα της ο Carnot απέδειξε ότι η μηχανή του παρήγαγε τη μέγιστη δυνατή κινητήρια δύναμη, και ότι η απόδοσή της ήταν ανεξάρτητη από το μέσο που χρησιμοποιούνταν (το αέριο) αλλά εξαρτώταν από τη διαφορά θερμοκρασίας της θερμής και ψυχρής δεξαμενής.

Παρά τη σημασία που δόθηκε στην πραγματεία του Carnot κατά τη δεκαετία του 1840, όταν «επανακαλύφθηκε» από τους αδελφούς James και William Thomson, το βιβλίο δεν είχε άμεσο αντίκτυπο στους συγχρόνους του. Ενώ τα ερωτήματα που έθετε ο Carnot ανήκαν στα προβλήματα που απασχολούσαν την εποχή εκείνη την κοινότητα των μηχανικών, οι απαντήσεις που έδωσε φάνταζαν περίεργες ή και άσχετες με την τεχνολογία των θερμικών μηχανών. Το ενδιαφέρον του Carnot να αναπτύξει μια γενική θεωρία για την κινητήρια δύναμη της θερμότητας για κάθε είδους μηχανής, δεν απαντούσε στα πρακτικά προβλήματα των μηχανικών. Έπειτα από μια σειρά θανατηφόρων ατυχημάτων με ατμομηχανές υψηλής πίεσης στις αρχές του 1820, τα ζητήματα ασφαλείας είχαν επαναπροσδιορίσει τα ερευνητικά προγράμματα μηχανικών και επιστημόνων. Στην πραγματεία του Carnot, δεν υπήρχε καμία αναφορά σε ζητήματα κατασκευής, κόστους, ασφάλειας, ευχρηστίας, θερμικών απωλειών κτλ. που απασχολούσαν ανάλογες πραγματείες.

Επίσης, μερικές από τις υποδείξεις του Carnot ήταν αρκετά κοινότοπες, όπως για παράδειγμα η προτροπή χρήσης ατμού υψηλής πίεσης και η εφαρμογή της αρχής της ελεύθερης εκτόνωσης.⁴ Με μια πρώτη ματιά, το βιβλίο του Carnot, φαινόταν ότι δεν είχε τίποτα να προσθέσει στην ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία. Αντιθέτως, δημιουργούσε επιπλέον δυσκολίες με τη χρήση όρων που δεν ήταν συνήθεις σε τεχνικές πραγματείες. Ο αναγνώστης θα έπρεπε να καταβάλει ιδιαίτερη προσπάθεια προκειμένου να κατανοήσει τα επιχειρήματα του Carnot. Το βιβλίο ήταν αποτρεπτικό ακόμα και για φυσικούς, οι οποίοι θα μπορούσαν να είχαν ενδιαφερθεί για ορισμένες παρατηρήσεις του σχετικά με τη θεωρία των αερίων. Σε μια εποχή όπου η μαθηματική φυσική άνθιζε στη Γαλλία, το βιβλίο περιείχε ελάχιστες μαθηματικές διατυπώσεις.

Το 1834 ο μηχανικός Émile Clapeyron επεξεργάστηκε εκ νέου την εργασία του Carnot και τη δημοσίευσε στο επιστημονικό περιοδικό *Journal de l'École Polytechnique*. Η έκδοσή του Clapeyron ήταν γραμμένη σε αναλυτικά μαθηματικά, και περιείχε μερικά

⁴ Σύμφωνα με την αρχή αυτή ο ατμός εισερχόταν στον κύλινδρο μόνο για ένα μέρος της διαδρομής του εμβόλου, επιτρέποντας την ελεύθερη εκτόνωσή του για το υπόλοιπο μέρος της διαδρομής.

επιπρόσθετα στοιχεία, καθώς και την εισαγωγή του διαγράμματος όγκου-πίεσης. Ωστόσο, οι προσπάθειες του Clapeyron να στρέψει την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας στα κύρια επιχειρήματα του Carnot απέβησαν και αυτές άκαρπες. Η σχεδόν παντελής περιφρόνηση του βιβλίου του Carnot αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της σημασίας της ύπαρξης ενός συγκεκριμένου πλαισίου, μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα η «νομιμοποίηση» κάθε πρακτικής. Δεν υπήρχε χώρος για εναλλακτικές προσεγγίσεις που βρίσκονταν εκτός της παράδοσης που δημιουργήθηκε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα σχετικά με τους τρόπους πραγμάτευσης της λειτουργίας θερμικών μηχανών.⁵ Οι λόγοι για τους οποίους κάποιες θεωρίες, ή κάποιες επιστημονικές πρακτικές, υπερισχύουν άλλων είναι σύνθετοι και δεν έχουν να κάνουν αποκλειστικά με την «ορθότητα» ή μη μιας θεωρίας. Συχνά συνδέονται άμεσα με ποικίλες σχέσεις εξουσίας, όπως πχ. αυτές που υποδηλώνει ένα συγκεκριμένο εκπαιδευτικό σύστημα, καθώς και με αξίες, κανόνες και συμβάσεις που εγγυόνται την συνοχή της επιστημονικής κοινότητας και την αποδοχή του έργου της από την κοινωνία. Όπως αναφέραμε προηγουμένως ο Carnot κατείχε μια περιθωριακή θέση στην κοινότητα των μηχανικών, και το έργο του είχε διαφορετικό χαρακτήρα από τα διάφορα εγχειρίδια που πραγματεύονταν τη θεωρία θερμικών μηχανών είτε αυτά προέρχονταν από τον ακαδημαϊκό χώρο είτε από το χώρο της πρακτικής μηχανικής.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1840, η αγγλική μετάφραση της εργασίας του Clapeyron έπεσε στα χέρια των James και William Thomson. Οι αδελφοί Thomson είχαν κληρονομήσει το ήθος της σκληρής εργασίας, της θρησκευτικής ανοχής και της αυτοπειθαρχίας όπως είχε διαμορφωθεί από τους Σκώτους διαφωτιστές του 18^{ου} αιώνα. Μια από τις κύριες έγνοιες τους ήταν η ελαχιστοποίηση της σπατάλης και η μεγιστοποίηση της απόδοσης των μηχανών (Smith, 1998, σελ.31). Μετά την ολοκλήρωση των σπουδών του στο Κάιμπριτζ, το 1845, ο William Thomson (1824-1907) – αργότερα γνωστός ως Lord Kelvin – επισκέφτηκε το εργαστήριο του πειραματικού φυσικού Victor Regnault στο Παρίσι προκειμένου να μαθητεύσει δίπλα του. Το εργαστήριο του Regnault, καθώς και η ενασχόληση του Γάλλου φυσικού με τη θερμομετρία και τις ατμομηχανές κέντρισαν ακόμα περισσότερο το ενδιαφέρον του νεαρού Thomson για θέματα που σχετιζόνταν με την απόδοση των θερμικών μηχανών, το μηχανικό έργο και την ελαχιστοποίηση της σπατάλης. Στο Παρίσι διάβασε το γαλλικό πρωτότυπο της εργασίας του Clapeyron, και λίγα χρόνια

⁵ Μια πάγια τακτική για την επίλυση των προβλημάτων που παρουσίαζαν οι πρώτες θεωρίες περί ατμομηχανών ήταν η χρήση συντελεστών, που σκοπό είχαν τη σύγκλιση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Η εκτεταμένη χρήση συντελεστών συνέβαλε στην παγίωση των υπαρχουσών θεωριών περί ατμομηχανών που χρησιμοποιούνταν τουλάχιστον μέχρι την δεκαετία του 1860, παρά το ότι συχνά βασίζονταν σε «λανθασμένες» φυσικές αρχές.

αργότερα κατόρθωσε να αποκτήσει το δυσεύρετο βιβλίο του Carnot. Τα επόμενα χρόνια οι αδελφοί Thomson ενστερνίστηκαν τη θεωρία του Carnot, με την οποία μπόρεσαν να εξηγήσουν την οικονομία που μπορούσε να επιτευχθεί στη θερμική μηχανή αέρος Stirling.

Ωστόσο ο ενθουσιασμός του William Thomson για την θεωρία του Carnot μετριάστηκε όταν στη συνάντηση της Βρετανικής Εταιρίας για την Προώθηση της Επιστήμης που έλαβε χώρα στην Οξφόρδη το 1847 συνάντησε τον James Prescott Joule (1818-1889), γιο ενός ζυθοποιού από το Μάντσεστερ, ο οποίος ισχυριζόταν ότι η θερμότητα και το μηχανικό έργο είναι δύο όψεις του ίδιου φαινομένου.

Οι πειραματικές μελέτες του Joule στις ηλεκτρικές μηχανές, στην ηλεκτροχημεία, και στον βολταϊκό ηλεκτρισμό παρείχαν ενδείξεις της ύπαρξης ενός ποσοτικού ισοδύναμου μηχανικού έργου και θερμότητας. Παρά τις αρχικά αποτυχημένες προσπάθειες να πείσει την Βασιλική Εταιρία του Λονδίνου για την σημασία των ερευνών του, ο Joule κατόρθωσε να αποκτήσει σταδιακά κύρος ως πειραματιστής και φυσικός φιλόσοφος. Τα πειράματά του κατά το πρώτο μισό της δεκαετίας του 1840 είχαν ως στόχο την ποσοτικοποίηση της σχέσης μεταξύ θερμότητας και έργου, τον ποσοτικό καθορισμό, δηλαδή, του μηχανικού ισοδύναμου της θερμότητας. Με την εμπειρία του από τη ζυθοποιία του πατέρα του, ο Joule είχε αναπτύξει εξαιρετικές ικανότητες στην θερμομετρία (Sibum, 1995). Στη συνάντηση της Οξφόρδης, όπου παρευρέθηκε ο Thomson, ο Joule παρουσίασε το περίφημο πείραμά του με τη συσκευή με τον πτερυγιοφόρο τροχό. Χρησιμοποιώντας τη συσκευή αυτή ο Joule κατόρθωσε να μετρήσει με σχετική ακρίβεια τη θερμότητα που αναπτύσσεται από την τριβή ενός ρευστού με έναν πτερυγιοφόρο τροχό, ο οποίος κινείται με τη βοήθεια ενός συστήματος τροχαλιών και βαρών. Το πείραμα αυτό υποδείκνυε πρώτον ότι η ποσότητα της θερμότητας που αναπτύσσεται λόγω τριβής είναι ανάλογη προς την ποσότητα του δαπανώμενου έργου, και δεύτερον ότι η ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για να υψωθεί η θερμοκρασία μιας λίμπρας νερού (0,453kg) κατά έναν βαθμό Φαρενάιτ ισοδυναμεί με το μηχανικό έργο της πτώσης 722 λιμπρών (327,5kg) από το ύψος ενός ποδός (0,3048m). Με βάση τα πειραματικά του δεδομένα ο Joule ήταν σε θέση να υποστηρίξει ότι η τριβή είναι μετατροπή έργου σε θερμότητα (Harman, 1994, σελ. 57-62).

Το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας είχε ωστόσο υπολογιστεί λίγο νωρίτερα από τον Γερμανό γιατρό Julius Robert Mayer (1814-1878) το 1842, ο οποίος παρείχε μια πρώτη εκτίμηση βασισμένος σε δεδομένα της θερμομετρίας από πειράματα συμπίεσης αερίων. Ο Mayer ενδιαφέρθηκε για τη σχέση μηχανικού έργου και θερμότητας, όταν σε ένα ταξίδι του στις Δυτικές Ινδίες το 1840 παρατήρησε ότι το αίμα στις φλέβες των ναυτικών ήταν τόσο έντονα κόκκινο που το μπέρδεψε με το αίμα που κυκλοφορεί στις αρτηρίες. Ο Mayer

απέδωσε την ιδιαιτερότητα αυτή στο γεγονός ότι στα τροπικά κλίματα, όπου απαιτείται μικρότερη παραγωγή θερμότητας από το σώμα, ο μεταβολισμός αφαιρούσε λιγότερο οξυγόνο από το αίμα (δεδομένου ότι το οξυγόνο χρειάζεται για την καύση). Εκτός από τη σχετικά κοινότοπη υπόθεση ότι η θερμότητα του σώματος παράγεται από την καύση της τροφής, ο Mayer υποστήριξε επίσης ότι η χημική «δύναμη» της τροφής που καταναλώνεται είναι ίση με τις «δυνάμεις» που παράγονται, δηλαδή τη θερμότητα και την κίνηση. Όταν επέστρεψε στο Heillbronn, ο Mayer υπολόγισε το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας, δηλώνοντας ότι η πτώση ενός βάρους από ύψος περίπου 365 μέτρων αντιστοιχεί στη θέρμανση ενός ίδιου βάρους από τους 0° στους 1° κελσίου (Caneva, 1993).

Η αποδοχή των ιδεών του Mayer ήταν μικρή. Ο ίδιος χρησιμοποιούσε φιλοσοφικού τύπου επιχειρήματα που δεν είχαν απήχηση στην κοινότητα των Γερμανών φυσικών οι οποίοι, θέλοντας να αποδεσμευτούν από την παράδοση της Naturphilosophie και του Ρομαντισμού⁶, αποδέχονταν ως επιστημονική γλώσσα μόνο την αυστηρή μαθηματική ανάλυση και τον ποσοτικό πειραματισμό. Μάλιστα, ο Mayer και ο Joule ενεπλάκησαν σε μια διαμάχη προτεραιότητας για την «ανακάλυψη» του μηχανικού ισοδύναμου της θερμότητας. Οι διαμάχες αυτές, οι οποίες πυροδοτούνταν και από άλλους φυσικούς, αποκαλύπτουν τις προσπάθειες ιδιοποίησης της νέας επιστήμης της θερμοδυναμικής. Δεν συμφωνούσαν όλοι για το πως η νέα αυτή επιστήμη θα έπρεπε να είναι και για το τι θα έπρεπε να πρεσβεύει για τη φύση και την κοινωνία. Συγκεκριμένα, μια ομάδα Βρετανών φυσικών είχε βαλθεί να αποδείξει ότι η επιστήμη της θερμοδυναμικής δεν έφερε επαναστατικές αλλαγές μόνο στη φυσική, αλλά και σε ολόκληρη τη φυσική φιλοσοφία η οποία παρουσιαζόταν άρρηκτα συνδεδεμένη με τις ανάγκες της νέας βιομηχανικής εποχής (Smith, 1998, σελ. 73-76, 181-182).

Η διατύπωση του μηχανικού ισοδύναμου της θερμότητας ανήκει σε μια παράδοση πειραματικών μελετών των αρχών του 19^{ου} αιώνα πάνω σε διαδικασίες μετατροπής, που στηρίζονταν εν μέρει στην πεποίθηση της ενότητας των δυνάμεων. Το 1846, μερικά χρόνια μετά την πρώτη δημοσίευση του Joule σχετικά με το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας, ο William Robert Grove δημοσίευσε το βιβλίο του «Ο συσχετισμός των φυσικών δυνάμεων», στο οποίο παρουσίασε την πεποίθηση του περί μετατροπής και αφθαρσίας των δυνάμεων ως ένα γενικό σύστημα φιλοσοφίας. Ωστόσο, όπως και στο έργο του Joule και του Mayer, η ποιοτική παρουσίαση των φαινομένων μετατροπής του Grove δεν θα πρέπει να συγχέεται με διατυπώσεις της αρχής διατήρησης της ενέργειας. Μονάχα στις αρχές της δεκαετίας του

⁶ Ρομαντισμός: πνευματικό κίνημα που εμφανίζεται στα τέλη του 18ου αιώνα και εναντιώνεται στον Διαφωτισμό, με κυρίαρχο στοιχείο του την επικράτηση του συναισθήματος έναντι της λογικής.

1850, ο μηχανικός William John Macquorn Rankine (1820-1872) και ο William Thomson επιχείρησαν μια μεταρρύθμιση της γλώσσας της μηχανικής και κατασκεύασαν την «επιστήμη της ενέργειας». Ο όρος «ενέργεια» που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1853 στην εργασία του Rankine «Περί του γενικού νόμου της μετατροπής της ενέργειας», δεν αντιπροσώπευε μονάχα τη θεωρία περί αλληλομετατροπής των δυνάμεων, αλλά και την αρχή διατήρησης της ενέργειας σύμφωνα με την οποία το σύνολο της υπαρκτής και εν δυνάμει ενέργειας στο σύμπαν είναι σταθερό.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η αρχή του Carnot ότι η θερμότητα διατηρείται ως ποσότητα, ερχόταν σε αντιπαράθεση με την πεποίθηση του Joule και του Mayer ότι κατά τη διάρκεια παραγωγής έργου η θερμότητα μετατρέπεται εν μέρει σε μηχανικό έργο. Η καταφανής αντίθεση μεταξύ των δύο θεωριών παρουσιάστηκε από τον Thomson το 1849 και επιλύθηκε ένα χρόνο αργότερα από τον Γερμανό φυσικό Rudolf Clausius (1822-1888). Ο Clausius προσέγγισε τον συσχετισμό θερμότητας και μηχανικού έργου μελετώντας τη λειτουργία των ατμομηχανών, και χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα του Regnault. Η σύνθεση των θεωριών του Carnot και του Joule που πρότεινε επιτυγχάνθηκε με την απόρριψη της αρχής διατήρησης της θερμότητας. Υποστήριξε ότι η θερμότητα που εισέρχεται σε μια θερμική μηχανή μεταφέρεται στην ψυχρή δεξαμενή μόνο εν μέρει, ενώ η υπόλοιπη καταναλώνεται και μετατρέπεται σε μηχανικό έργο.

Παρά την αποδοχή της σύνθεσης των θεωριών του Carnot και του Joule από τον Clausius, ο Thomson κατέδειξε ένα ακόμα θεμελιώδες πρόβλημα: ενώ η μετατροπή της θερμότητας σε μηχανικό έργο ίσχυε για θερμικές μηχανές που λειτουργούν με ροή θερμότητας από υψηλές σε χαμηλές θερμοκρασίες, η επαναμετατροπή ή η επανάκτηση της «χαμένης» θερμότητας, όπως αυτής εξαιτίας της τριβής σε μη-ιδανικές μηχανές, δεν ήταν δυνατή. Το πρόβλημα αυτό το είχε ήδη αναγνωρίσει ο Clausius, ο οποίος υποστήριξε ότι «η γενική συμπεριφορά της θερμότητας έχει την τάση να εξομαλύνει τις διαφορές θερμοκρασίες, και άρα να περνάει από ένα θερμό σώμα στο ψυχρότερο». Το 1865 ο Clausius επινόησε μια καινούργια λέξη, την «εντροπία», από την ελληνική λέξη «τροπή» που σημαίνει μετασχηματισμός, και διατύπωσε τους δύο νόμους της θερμοδυναμικής που περικλείουν όσα αναφέραμε προηγουμένως για τη θεωρία των Carnot και Joule, και το πρόβλημα της «χαμένης» θερμότητας, ή αλλιώς της ποιοτικής υποβάθμισης της ενέργειας:

- (1) Η ενέργεια του σύμπαντος παραμένει σταθερή,
- (2) Η εντροπία του σύμπαντος τείνει προς το άπειρο.

Το σύμπαν του Thomson και του Clausius δήλωνε μια κατεύθυνση: η ευκαιρία του

να παράγει κανείς ωφέλιμο έργο χανόταν συνεχώς. Κάθε φορά που μια μηχανή λειτουργούσε, η τριβή, η κακή λίπανση, η ατελής μόνωση και ένας αριθμός άλλων παραγόντων συνέβαλλε στη κατασπατάληση ενέργειας. Ο Thomson και οι συμπατριώτες του έβλεπαν στην νέα επιστήμη της ενέργειας μια *ηθική* προσταγή. Εάν η ενέργεια χάνεται συνεχώς, τότε υποχρέωση του ανθρώπου είναι να την εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν περισσότερο. Οι λειτουργίες της φύσης μπορούν να κατευθυνθούν προς όφελος του ανθρώπου, αλλά όχι και να αντιστραφούν. Σύμφωνα με τους Βρετανούς φυσικούς φιλοσόφους το σύμπαν είχε αρχή και τέλος, και το τέλος θα έφτανε όταν η θερμοκρασία του σύμπαντος θα ήταν παντού ομοιόμορφη. Χωρίς τη ροή θερμοκρασίας τα πάντα θα έμεναν στάσιμα. Η έννοια του θερμικού θανάτου του σύμπαντος κέντρισε την φαντασία πολλών εκλαϊκευτών της επιστήμης, και συγγραφέων, που παρουσίασαν ζοφερές εικόνες για το τέλος του κόσμου (Morus, 2005, σελ.140-1).

Η ανάδυση της θερμοδυναμικής και της έννοιας της ενέργειας, σε μια εποχή όπου τα όρια των κλάδων και υπο-κλάδων της φυσικής και της χημείας ήταν υπό συνεχή διαπραγμάτευση, έτυχε διαφορετικών ερμηνειών και υπήρξε το επίκεντρο έντονων διαμαχών σχετικά με τις οντολογικές, μεθολογικές και φιλοσοφικές παραδοχές της. Ο όρος «ενεργητική» που προτάθηκε για την περιγραφή του νέου αυτού επιστημονικού πεδίου, δεν έγινε καθολικά αποδεκτός από της επιστημονική κοινότητα.

Η θερμοδυναμική αρχικά αναπτύχθηκε ως μια μακροσκοπική θεωρία, δηλαδή ως μια θεωρία που δεν λάμβανε υπόψη της τη μοριακή δομή της ύλης αλλά περιέγραφε τα θερμικά φαινόμενα. Τα δύο αξιώματα της θερμοδυναμικής (βλ. παραπάνω) είναι διατυπωμένα ανεξάρτητα από κάθε υπόθεση σχετικά με τη φύση της ύλης. Ωστόσο, από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις ως προς τη θερμοδυναμική. Η πρώτη είχε ως σκοπό την ερμηνεία της θερμοδυναμικής υπό το πρίσμα του ατομισμού, προβάλλοντας την υπόθεση ότι η θερμότητα δεν είναι άλλο από τις κινήσεις των δομικών σωματιδίων της ύλης. Η περιγραφή της κίνησης των σωματιδίων αυτών και η σύνδεσή τους με τα θερμικά φαινόμενα, έγινε μέσω της εφαρμογής στατιστικών νόμων και της θεωρίας των πιθανοτήτων. Ωστόσο, η χρήση μοριακών μοντέλων για την ερμηνεία της θερμοδυναμικής δεν ήταν καθολικά αποδεκτή. Ειδικά κατά τις τελευταίες δεκαετίες του 19^{ου} αιώνα, οι δυσκολίες προσαρμογής της θερμοδυναμικής στα περίπλοκα στατιστικά μοντέλα μοριακής κίνησης που προτάθηκαν, επανέφεραν στο προσκήνιο επιχειρήματα υπέρ του μακροσκοπικού χαρακτήρα της θερμοδυναμικής. Από τους μεγαλύτερους πολέμιους της χρήσης ατομιστικών εννοιών υπήρξε ο Friedrich Wilhelm Ostwald (1853-1932), ο οποίος έθεσε τα θεμέλια της «ενεργητικής», υποστηρίζοντας ότι η ενέργεια αποτελεί τη μοναδική οντότητα στη φύση και

ότι η ύλη είναι ένα απλό παράγωγο της. Αντίστοιχα, ο Γάλλος φυσικός Pierre Duhem (1861-1916) αντιτάχθηκε στη χρήση μηχανικών μοντέλων και υποστήριξε το μακροσκοπικό χαρακτήρα της θερμοδυναμικής που θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για τις επιστήμες της φυσικής και της χημείας.

Η διαμάχη μεταξύ των οπαδών του μακροσκοπικού χαρακτήρα της θερμοδυναμικής, και αυτών της μικροσκοπικής ερμηνείας της έχει τις ρίζες της σε διαφορετικές μεθοδολογικές, φιλοσοφικές, οντολογικές αλλά και ιδεολογικές παραδοχές που υιοθετήθηκαν από διαφορετικές ομάδες επιστημόνων. Μια συστηματικότερη επισκόπησή της θα μας απομακρύνει από το σκοπό του εισαγωγικού αυτού κειμένου. Ωστόσο, θα πρέπει να συγκρατήσουμε ότι στο επιστημονικό επίπεδο, η έννοια της ενέργειας, προϊόν – όπως είδαμε – μιας σειράς επιστημονικών, τεχνολογικών αλλά και πολιτισμικών διεργασιών που έλαβαν χώρα κατά τον 19^ο αιώνα, απέκτησε σταδιακά ενοποιητικό ρόλο για μια σειρά φαινομένων (μηχανικά, θερμικά, ηλεκτρικά, μαγνητικά και οπτικά) και αποτέλεσε κατ’ αυτόν τον τρόπο ακρογωνιαίο λίθο της κλασικής φυσικής.

Φαίδρα Παпанελοπούλου

Βιβλιογραφία

Ken Caneva, *Robert Mayer and the Conservation of Energy* (Princeton: Princeton University Press, 1993)

Donald Cardwell, *Ιστορία της Τεχνολογίας* (Αθήνα: Μεταίχμιο, 2000)

Sadi Carnot, *Reflections on the Motive Power of Fire* (translated and edited by Robert Fox) (Manchester: Manchester University Press, 1986)

Bruce Clarke, *Energy Forms. Allegory and Science in the Era of Classical Thermodynamics* (The University of Michigan Press, 2001)

Kostas Gavroglu, ‘Types of discourse and the reading of the history of the physical sciences’ στο Kostas Gavroglu et al (eds), *Trends in the historiography of science* (Dordrecht: Kluwer, 1994)

Peter M. Harman, *Ενέργεια, Δύναμη και Ύλη. Η εννοιολογική εξέλιξη της φυσικής κατά τον 19ο αιώνα* (Κρήτη: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1994)

Thomas Kuhn, ‘Energy Conservation as an example of simultaneous discovery’, *The Essential Tension* (Chicago: University of Chicago Press, 1977)

Iwan Rhys Morus, *When Physics became King* (Chicago, London: Chicago University Press,

2005)

Faidra Papanelopoulou, 'Gustave-Adolphe Hirn: engineering thermodynamics in mid-nineteenth-century France', *British Journal for the History of Science* (2006), 39 (2), pp. 231-254

Heinz Otto Sibum, 'Reworking the mechanical equivalent of heat: instruments of precision and gestures of accuracy in early Victorian England', *Studies in the History and Philosophy of Science* (1995) 26, pp. 73-106

Crosbie Smith, *The Science of Energy. A Cultural History of Energy Physics in Victorian Britain* (London: The Athlone Press, 1998)

Jan Hendrick Van den Berg, *The two principal laws of thermodynamics: a cultural and historical interpretation* (Pittsburgh: Duquesne University Press, 2004)