

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1

Ε. Μολυβδά-Αθανασοπούλου

Ενέργεια,
Έργο και Θερμότητα

1. Ενέργεια, Έργο και Θερμότητα

Η **ενέργεια** είναι μια βασική ιδιότητα της ύλης που χαρακτηρίζει την κατάσταση ενός σώματος και σχετίζεται άμεσα με την δυνατότητα παραγωγής έργου ή αλλαγής της κατάστασης του. Στην πραγματικότητα είναι μια από τις πιο αόριστες έννοιες στη Φυσική. Αντίθετα, το **έργο** και η **ισχύς** είναι δύο φυσικά μεγέθη που ορίζονται σαφώς και κατανοητά.

Η έννοια της ενέργειας χρησιμοποιείται ευρύτατα, από την καθημερινή μας ζωή (ηλεκτρική ενέργεια, καύσιμα, «πράσινη» ενέργεια) μέχρι τους διάφορους επιστημονικούς κλάδους όπως φυσική, χημεία, βιολογία που την διαπραγματεύονται.

Σύμφωνα με τον Feynman «Η ενέργεια είναι κάτι τελείως ακαθόριστο γιατί δεν περιγράφει κάποιο φυσικό φαινόμενο ή διαδικασία. Στην πραγματικότητα δεν είναι παρά ένα αριθμητικό νούμερο που παραμένει το ίδιο ανεξάρτητα από τις αλλαγές και τα φαινόμενα που συμβαίνουν.»

Όλοι οι ζώντες οργανισμοί χρειάζονται ενέργεια για την διατήρηση της ζωής. Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί την ενέργεια που παίρνει από τις τροφές και το οξυγόνο για τις ζωτικές του λειτουργίες και την παραγωγή έργου και θερμότητας.

Η **θερμότητα** είναι μια μορφή ενέργειας που συνοδεύει πολλά φαινόμενα όπως π.χ. την τριβή ή την κρούση και οφείλεται στην κινητική κατάσταση των μορίων. Η θερμότητα που παράγεται στο σώμα μας, ως προϊόν των χημικών αντιδράσεων κατά την διάσπαση των τροφών ή άλλων, χρησιμοποιείται για την διατήρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του σώματος στους 37 °C και το υπόλοιπο αποβάλλεται στο περιβάλλον. Η σταθερή θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα ο οργανισμός να λειτουργεί βέλτιστα για μεγάλο εύρος εξωτερικών θερμοκρασιών. Αν και η ρύθμιση της θερμοκρασίας απαιτεί επιπρόσθετη κατανάλωση ενέργειας, αποζημιώνεται από την προσαρμοστικότητα που επιτυγχάνει.

Τα φαινόμενα που συνδέονται με την θερμότητα εξετάζονται είτε με βάση την κινητική θεωρία των μορίων είτε μακροσκοπικά από την θερμοδυναμική όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό.

1.1. Διατήρηση της ενέργειας

Ο θεμελιώδης νόμος που αφορά στην ενέργεια είναι ο **νόμος της διατήρησης της ενέργειας**. Σύμφωνα με αυτόν, η συνολική ενέργεια ενός κλειστού συστήματος, δηλαδή ενός συστήματος που δεν ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον του είναι σταθερή. Έχει δε την προσθετική ιδιότητα: η συνολική ενέργεια ενός συστήματος είναι ίση με το άθροισμα των ενεργειών των μερών του. Ο νόμος αυτός διέπει όλα τα φαινόμενα που συμβαίνουν στη φύση χωρίς καμιά εξαίρεση.

Η ενέργεια δεν μπορεί να δημιουργηθεί ούτε να καταστραφεί. Είναι δυνατόν όμως να αλλάζει μορφή π.χ. η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα στην περίπτωση της τριβής ή αν συνδέσουμε μια μπαταρία με έναν ηλεκτρικό κινητήρα η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική και αυτή στην συνέχεια σε μηχανική.

Όταν ένα σύστημα δεν είναι απομονωμένο, οι αλλαγές της ενέργειάς του που οφείλονται σε εξωτερικές επιδράσεις είναι ίσες και αντίθετες με το **αλγεβρικό άθροισμα των μεταβολών της ενέργειας όλων των σωμάτων και πεδίων που αλληλεπιδρούν με το σύστημα.**

Με την εφαρμογή του νόμου του Einstein για την ισοδυναμία μάζας – ενέργειας ($E=mc^2$), ο νόμος της διατήρησης της ενέργειας περιλαμβάνει και την μάζα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης (Α Τόμος σελ. 77).

Μονάδα έργου και ενέργειας είναι το J (Joule). Ένα J ισούται με: $1 J=1 N \cdot m$

Η ενέργεια έχει διάφορες μορφές και η μια μορφή μπορεί να μετατραπεί σε κάποια άλλη. Ανάλογα με την μορφή της ενέργειας (μηχανική, δυναμική, χημική, ηλεκτρική, θερμότητα) και το πρόβλημα που περιγράφουμε συχνά χρησιμοποιούνται και άλλες μονάδες, όλες όμως εκφράζονται σε J.

Θερμική ενέργεια

$$1 \text{ cal}=4.18 \text{ J (μηχανικό ισοδύναμο θερμότητας)}$$

$$1 \text{ Cal}=1000 \text{ cal}$$

Ενέργεια ακτινοβολίας

$$1 \text{ eV}=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ keV}=1.6 \cdot 10^{-16} \text{ J}$$

Ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Η μεταφορά ενέργειας, δηλαδή η ανταλλαγή ενέργειας ενός σώματος με το περιβάλλον του μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους οι πιο συνηθισμένοι από τους οποίους είναι η παραγωγή μηχανικού έργου και η θερμότητα.

1.2. Έργο σταθερής και μεταβλητής δύναμης

Κατ' αρχή μπορούμε να θεωρήσουμε την ενέργεια σαν την δυνατότητα παραγωγής έργου, δηλαδή την δυνατότητα μιας δύναμης να μετακινήσει το σημείο εφαρμογής της. Το ποσό του έργου που παράγεται όταν μετακινείται μια δύναμη F κατά μια απόσταση d ή η ενέργεια που καταναλώνεται για την μεταβολή αυτή ισούται με το γινόμενο της δύναμης επί την απόσταση κατά την διεύθυνση της μετακίνησης.

$$W = F \cdot d \quad (1.1)$$

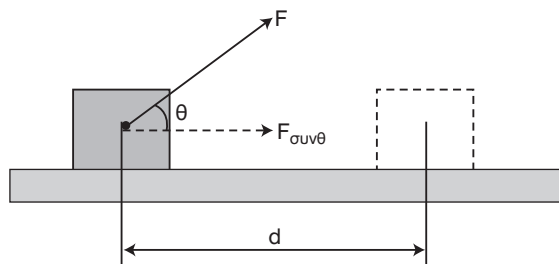
Εάν η διεύθυνση της δύναμης σχηματίζει γωνία με την μετατόπιση, τότε έργο παράγει η παράλληλη συνιστώσα (Σχήμα 1.1.).

$$W = (F \cos \theta) \cdot d \quad (1.2)$$

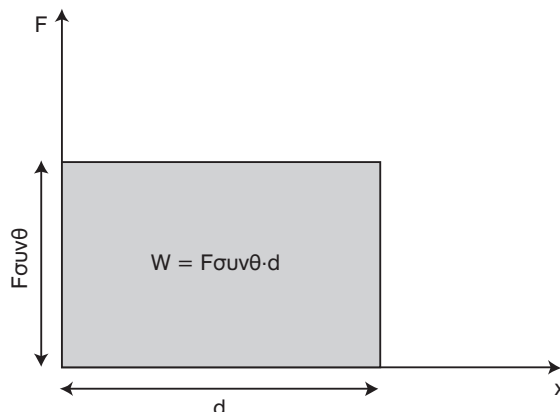
Το έργο μιας σταθερής δύναμης ισούται αριθμητικά με το εμβαδόν ενός ορθογώνιου παραλληλογράμμου με πλευρές την δύναμη (F ή $F \cos \theta$) και την μετατόπιση (Σχήμα 1.2).

Το έργο μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό, ανάλογα με το αν η μετακίνηση του σώματος είναι κατά την διεύθυνση της δύναμης ή το αντίθετο. Ο παράγοντας $\cos \theta$ καθορίζει αυτόματα και το πρόσημο του έργου. Αρνητικό έργο έχουμε, για παράδειγμα, στην φάση της πέδησης ενός κινητού.

Εάν η δύναμη που μετακινεί ένα σώμα έχει σταθερή διεύθυνση αλλά μεταβλητό μέτρο, τότε το έργο που παράγεται δεν υπολογίζεται από την σχέση 1.2. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι όταν το σώμα μετατοπίζεται κατά ένα πολύ μικρό διάστημα Δx η δύναμη είναι σταθερή και το αντίστοιχο έργο δίνε-



Σχήμα 1.1. Κατά την μετακίνηση του σώματος έργο παράγει η συνιστώσα $F \cos \theta$.



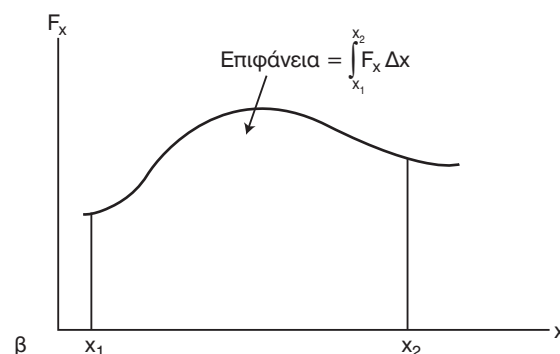
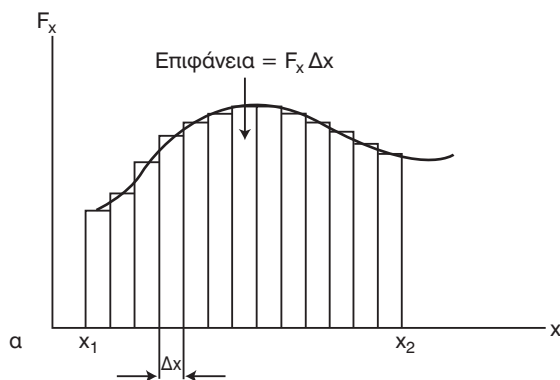
Σχήμα 1.2. Έργο σταθερής δύναμης

ται από την σχέση $\Delta W = F_x \cdot \Delta x$ (Σχήμα 1.3α). Το δε συνολικό έργο θα δίνεται από το άθροισμα των επί μέρους έργων

$$W = \sum F_x \cdot \Delta x \quad (1.3)$$

Εάν οι μετακινήσεις γίνουν απειροστές η σχέση 1.3 γίνεται

$$W = \int F_x dx \quad (1.4)$$



Σχήμα 1.3. Έργο μεταβλητής δύναμης. α) Το έργο ισούται με το άθροισμα των εμβαδών των παραλληλογράμμων. β) Το έργο ισούται με το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη.

Το έργο που παράγει η μεταβαλλόμενη δύναμη F_x καθώς το σώμα κινείται ισούται, όπως φαίνεται γραφικά, με την επιφάνεια που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη (Σχήμα 1.3β).

Έργο παράγεται από διάφορους μηχανισμούς που μπορεί να είναι απλοί ή σύνθετοι.

Ως **μηχανές** ορίζονται συστήματα σωμάτων — διατάξεις — που μετατρέπουν μια μορφή ενέργειας σε μια άλλη που είναι ωφέλιμη για μας και μπορεί να είναι σύνθετες ή απλές όπως ένας μοχλός ή μια τροχαλία. Σε κάθε μηχανή υπάρχει μια ενέργεια εισόδου που είναι συνήθως μεγαλύτερη από το έργο που παράγει. Ως **ενεργειακή απόδοση** (α) ορίζεται ο λόγος του έργου που παράγεται προς το καταναλισκόμενο.

α = παραγόμενο έργο/καταναλισκόμενο έργο

Στο ανθρώπινο σώμα υπάρχουν διάφορες μηχανές με τις οποίες γίνονται ενεργειακές μεταβολές και παραγωγή ωφέλιμου έργου. Μια απλή μηχανή αποτελεί το χέρι που σηκώνει ένα βάρος (Σχήμα 1.4α). Στην περίπτωση αυτή σχηματίζεται ένας μοχλός τρίτου είδους όπου το υπομόχλιο βρίσκεται στο ένα άκρο του μοχλού, δηλαδή μια μηχανή με μηχανικό πλεονέκτημα μικρότερο της μονάδας. Θεωρούμε ότι το άνω άκρο είναι καθηλωμένο στην άρθρωση του ώμου συγκρατούμενο από τους αντίστοιχους μύες.

Οι δυνάμεις που εμφανίζονται είναι το βάρος του αντικειμένου, W , η δύναμη του μυός F_m και η αντίδραση στην άρθρωση F_r (Σχήμα 1.4β) Το βάρος σπρώχνει το χέρι προς τα κάτω, άρα η δύναμη του μυός κατευθύνεται προς τα επάνω. Η δράση αυτή ασκείται κυρίως από τον δικέφαλο μυ.

Στην οριζόντια θέση το χέρι ισορροπεί άρα ισχύουν οι εξής 3 εξισώσεις από τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε τις δυνάμεις F_m , F_r και την γωνία ϕ ενώ η θ υπολογίζεται από τα ανατομικά χαρακτηριστικά:

$$F_m \cdot \sin\theta = F_r \cdot \sin\phi \quad (\Sigma F_x = 0) \quad (1.5)$$

$$F_m \cdot \eta\mu\theta = W + F_r \cdot \eta\mu\phi \quad (\Sigma F_y = 0) \quad (1.6)$$

$$(F_m \cdot \eta\mu\theta)s_1 = W \cdot s \quad (\Sigma M = 0) \quad (1.7)$$

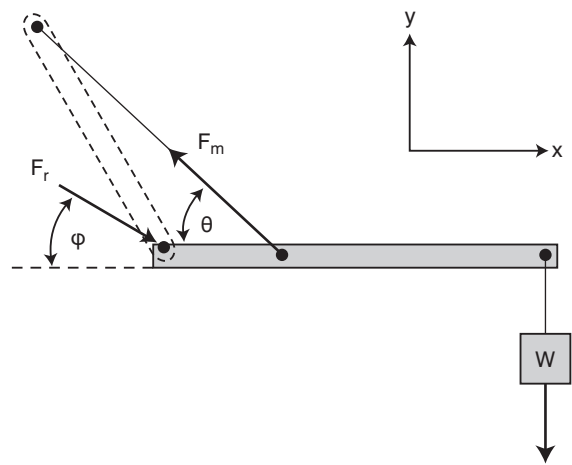
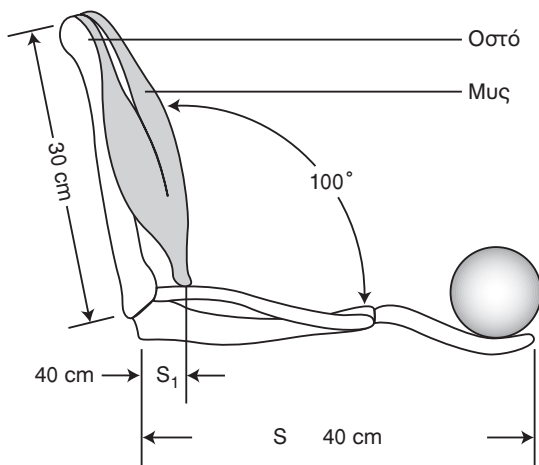
Από τα ανατομικά χαρακτηριστικά θεωρούμε ότι $s=40$ cm, $s_1=4$ cm, $\theta=100^\circ$

$$(1.7) \Rightarrow (F_m \cdot \eta\mu\theta) = W \cdot 40 \text{ ή } F_m = \frac{10W}{0.985} = 10.15W$$

Στη θέση αυτή που ισορροπεί το χέρι δεν παράγεται έργο μια που το σημείο εφαρμογής των δυνάμεων δεν μετακινείται. Εντούτοις καταναλώνεται σημαντική ενέργεια από τους μύες στην προσπάθεια που καταβάλουν ώστε να παραμένουν σ' αυτήν την θέση.

Ας δούμε τώρα τι θα συμβεί αν το χέρι σηκώσει το βάρος. Το έργο που θα παραχθεί ισούται με την μεταβολή της δυναμικής ενέργειας του αντικειμένου, άρα αν ανυψωθεί κατά 20 cm θα είναι ίσο με $0.2 \cdot W$ (J). Αν υποθέσουμε ότι η απόδοση των μυών είναι 20%, τότε η ενέργεια που δαπανήθηκε από το σώμα μας για αυτήν την δράση ήταν $0.2 \cdot 5 \cdot W$ (J).

Παράδειγμα: Αν η μάζα του αντικειμένου είναι 200 g τότε η ενέργεια που δαπανάται είναι $0.2 \cdot 5 \cdot 0.2 \cdot 9.8 = 1.96$ (J) ή 0.469 cal.



Σχήμα 1.4. Χέρι που φέρει μια σφαίρα. α) Ανατομικά στοιχεία. β) Αναπαράσταση του μοχλού που σχηματίζεται και των δυνάμεων που ασκούνται.

1.3. Ενέργεια και ανθρώπινο σώμα

Όλοι οι ζώντες οργανισμοί χρειάζονται ενέργεια για να λειτουργήσουν. Η ενέργεια αυτή καταναλώνεται για βασικές λειτουργίες του οργανισμού όπως η κυκλοφορία του αίματος, η αναπνοή, η ανανέωση των κυττάρων αλλά και άλλες που παράγουν έργο όπως η κίνηση ή η ανύψωση βάρους. Έτσι, ακόμα και σε απόλυτη ακινησία το ανθρώπινο σώμα απαιτεί ενέργεια για να διατηρήσει τις ζωτικές του λειτουργίες. Ένας τυπικός άνθρωπος χωρίς να ασκείται καταναλώνει περίπου 90 kcal/hr. Η απαιτούμενη ενέργεια λαμβάνεται από τις τροφές (υδατάνθρακες, λίπη, πρωτεΐνες), είναι δηλαδή χημική ενέργεια. Μεγάλο μέρος αυτής της ενέργειας μετατρέπεται τελικά σε θερμότητα. Ο άνθρωπος δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει την θερμότητα για παραγωγή έργου, έτσι αυτή αποδίδεται στο περιβάλλον.

Η ενεργειακή απόδοση του σώματος ως μηχανή παραγωγής εξωτερικού έργου, δηλαδή ο λόγος του έργου που παράγεται προς την ενέργεια που δαπανάται, υπολογίζεται σε 5% περίπου. Η τιμή αυτή αυξάνει κατά την σωματική άσκηση και ιδιαίτερα στους αθλητές.

Η μικρή ενεργειακή απόδοση δημιουργεί κατ' αρχή την εντύπωση ότι ο άνθρωπος είναι εξαιρετικά ενεργοβόρα μηχανή. Πρέπει όμως να αναλογισθούμε ότι στους αναπτυσσόμενους οργανισμούς η ενέργεια χρησιμοποιείται ώστε οι ιστοί και τα όργανα να διατηρούνται σε υψηλή τάξη σε σύγκριση με τα μόρια των χημικών στοιχείων από τα οποία αποτελούνται. Αυτό είναι σε αντίθεση με την κατεύθυνση των αυθόρμητων μεταβολών. Σύμφωνα με το Β' θερμοδυναμικό Αξίωμα η εντροπία ενός συστήματος συνεχώς αυξάνει, άρα οδηγείται από την τάξη στην αταξία. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το κύτταρο όπου η συγκέντρωση των ανόργανων ενώσεων στο εσωτερικό του είναι διαφορετική απ' ότι στο περιβάλλον. Η αυθόρμητη τάση θα ήταν να επέλθει ισορροπία. Για την διατήρηση της ενδοκυττάριας συγκέντρωσης απαιτείται η κατανάλωση έργου.

Μπορούμε να πούμε λοιπόν, ότι η διαδικασία της ζωής συνίσταται στην οικοδόμηση και διατήρηση δομών υψηλής τάξης με κατανάλωση μεγάλων ποσών ενέργειας

1.4. Ισχύς

Συχνά μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε όχι μόνο την ενέργεια ή το έργο που παράγεται αλλά και τον ρυθμό παραγωγής αυτού ώστε να εκτιμήσουμε την ικανότητα της μηχανής να παράγει έργο. **Ισχύς** ονο-

μάζεται ο λόγος μεταφοράς ενέργειας ή παραγωγής έργου ανά μονάδα χρόνου:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad \text{ή} \quad P = F \frac{\Delta d}{\Delta t} = F \cdot u \quad (1.8)$$

Μονάδα ισχύος στο SI είναι το Watt (W) που ισούται με: $1W = 1 \text{ J/s}$.

Στο βρετανικό σύστημα μονάδα ισχύος είναι ο ίππος (hp). Ένας ίππος ισούται με 746 W. Η μονάδα αυτή συχνά χρησιμοποιείται για τις μηχανές.

Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα έναν άνθρωπο 70 kgf που εκτελεί επί τόπου άλματα ύψους 30 cm με ρυθμό ένα άλμα ανά sec επί 5 min. Από παρατηρήσεις έχει βρεθεί ότι ο χρόνος της προς τα άνω κίνησης είναι 0.2 s και θέλουμε να υπολογίσουμε την παραγόμενη ισχύ.

Το έργο που παράγεται σε κάθε άλμα είναι ίσο με το βάρος επί το ύψος του άλματος

$$W = 70 \cdot 9.8 \cdot 0.3 = 205.8 \text{ J}$$

Η δε ισχύς είναι ίση με:

$$P = W/t = 205.8/0.2 = 1029 \text{ W}$$

Για το σύνολο της άσκησης, το έργο θα είναι $205.8 \cdot 300 = 61.7 \cdot 10^3 \text{ J}$ και αν θεωρήσουμε ότι η απόδοση του σώματος είναι 15% τότε η καταναλισκόμενη ενέργεια είναι $411.33 \cdot 10^3 \text{ J}$ (98 kcal).

Η δε ισχύς θα είναι ίση με:

$$P' = 411.33 \cdot 10^3 / 300 = 1371 \text{ W}$$

1.5. Θερμότητα και θερμοκρασία

Εάν έρθουμε σε επαφή με τα διάφορα σώματα που μας περιβάλλουν μπορούμε να τα χαρακτηρίσουμε ως θερμά ή ψυχρά. Το φυσικό μέγεθος με βάση το οποίο μπορούμε να χαρακτηρίσουμε συγκριτικά κατά πόσο ένα σώμα είναι θερμότερο ή ψυχρότερο ενός άλλου ονομάζεται **θερμοκρασία**.

Τα άτομα και τα μόρια ενός σώματος στην θερμοκρασία του απολύτου μηδενός είναι ακίνητα. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αρχίζουν να κινούνται (θερμική κίνηση). Τα άτομα και μόρια των στερεών εκτελούν ταλαντώσεις γύρω από ένα σημείο ισορροπίας ενώ τα μόρια των αερίων κινούνται άτακτα.

Η θερμοκρασία του σώματος αποτελεί έναν δείκτη της θερμικής κίνησης των μορίων. Τα μόρια των στοιχείων δεν έχουν μόνο την κινητική ενέργεια λόγω της θερμικής κίνησης. Στην πραγματικότητα το σύνολο της ενεργείας (U) που περιέχουν είναι ένα ίσο με $U = E(\text{θερμική κίνηση μορίων}) + E(\text{δυναμική})$ (που οφείλεται στις αλληλοεπιδράσεις μορίων – δυνάμεις Van der Waals) + $E(\text{ηλεκτρο-}$

νίων από περιστροφή) + E(πυρήνων). Η ενέργεια U ονομάζεται **εσωτερική ενέργεια**.

Όταν δύο σώματα διαφορετικής θερμοκρασίας έρθουν σε επαφή παρατηρούμε ότι ύστερα από ένα χρονικό διάστημα οι δύο θερμοκρασίες θα εξισωθούν. Αυτό σημαίνει ότι τα μόρια του αρχικά ψυχρότερου σώματος έχουν τώρα περισσότερη ενέργεια ενώ τα μόρια του αρχικά θερμότερου έχουν λιγότερη ενέργεια. Μεταφέρθηκε, δηλαδή, ενέργεια από το θερμότερο στο ψυχρότερο σώμα.

Το ποσό της ενέργειας που προσάγεται ή απάγεται από ένα σώμα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας ονομάζεται **θερμότητα**.

Το ποσό της θερμότητας που περικλείει ένα σώμα προκαλεί την θερμική κίνηση των μορίων. Όπως είναι φανερό η θερμότητα δεν ταυτίζεται με την εσωτερική ενέργεια των σωμάτων.

1.5.1. Θερμομετρικές κλίμακες

Η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται με αντικειμενικό τρόπο και στηρίζεται στην μεταβολή κάποιων φυσικών ιδιοτήτων και όχι στο αίσθημα ψυχρού ή θερμού που μας προκαλεί. Τα όργανα που χρησιμοποιούνται ονομάζονται θερμοόμετρα και η μέτρηση εκφράζεται με βάση κάποια αριθμητική κλίμακα που ονομάζεται θερμομετρική.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται έμμεσα, με την μέτρηση άλλων μεγεθών που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία όπως οι διαστάσεις ενός σώματος (διαστολή/συστολή) ή η ηλεκτρική αντίσταση. Η φυσική ιδιότητα που χρησιμοποιείται μεταβάλλεται γραμμικά με την θερμοκρασία και ονομάζεται **θερμομετρική ιδιότητα**. Κάθε θερμοόμετρο φέρει μία βαθμολογημένη κλίμακα. Η βαθμολογία γίνεται ως εξής:

Επιλέγουμε αυθαίρετα δύο καταστάσεις αναφοράς στις οποίες αντιστοιχούμε δύο τιμές θερμοκρασίας και το ενδιάμεσο διάστημα το χωρίζουμε σε ίσα διαστήματα που ονομάζονται **βαθμοί**. Ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη θερμομετρική ιδιότητα, τις θερμοκρασίες αναφοράς και τον αριθμό των υποδιαιρέσεων προκύπτουν διάφορες θερμομετρικές κλίμακες.

Κλίμακα Κελσίου

Για την κατάστρωση της κλίμακας Κελσίου χρησιμοποιείται η μεταβολή του όγκου ορισμένης ποσότητας υδραργύρου που βρίσκεται σε γυάλινο σωλήνα όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Οι καταστάσεις αναφοράς που χρησιμοποιούνται είναι το σημείο τήξης πάγου και το σημείο βρασμού του ύδατος σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Στα σημεία αυτά αποδίδονται οι τιμές 0° και 100° αντίστοιχα. Το δε ενδιάμεσο διάστημα χωρίζεται σε 100 βαθμούς ($^\circ\text{C}$).

Κλίμακα Φαρενάιτ

Η κλίμακα αυτή χρησιμοποιεί τις ίδιες καταστάσεις αναφοράς με την κλίμακα Κελσίου αλλά τους αποδίδονται διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας. Η τιμή τήξης πάγου ορίζεται 32° και η τιμή βρασμού ύδατος, 212° . Το δε ενδιάμεσο διάστημα χωρίζεται σε 180 βαθμούς ($^\circ\text{F}$). Η σχέση που συνδέει τους βαθμούς Κελσίου με τους βαθμούς Φαρενάιτ είναι:

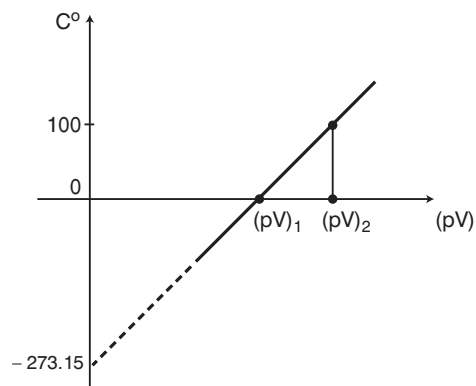
$$\theta \text{ }^\circ\text{C} = \frac{5}{9} (\theta \text{ }^\circ\text{F} - 32) \quad (1.9)$$

Κλίμακα Κέλβιν (θερμοδυναμική Κλίμακα)

Η κλίμακα Κέλβιν στηρίζεται στις ιδιότητες των ιδανικών αερίων. Για ορισμένη μάζα αερίου ισχύει η σχέση $P \cdot V = nRT$, δηλαδή το γινόμενο πίεσης επί όγκο είναι ανάλογο της θερμοκρασίας T. Το γινόμενο αυτό ($P \cdot V$) χρησιμοποιείται ως θερμομετρική ιδιότητα. Για την κατάστρωση της κλίμακας αυτής παίρνουμε την τιμή του γινομένου $P \cdot V$ ενός αερίου σε δύο καταστάσεις αναφοράς (τήξη πάγου και βρασμός ύδατος) και το εκφράζουμε με βάση την εκατονταβάθμια κλίμακα (Σχ. 1.5). Παρατηρούμε ότι η προέκταση της ευθείας τέμνει τον άξονα των ψ στο σημείο -273.15° . Το σημείο αυτό ορίζεται ως το μηδέν της κλίμακας Κέλβιν και ο βαθμός της ισούται με τον βαθμό της κλίμακας Κελσίου.

$$\begin{aligned} \theta \text{ }^\circ\text{C} &= (273.15 + \theta) \text{ }^\circ\text{K} \\ 0 \text{ }^\circ\text{K} &= -273.15 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Επειδή ο όγκος ενός αερίου δεν μηδενίζεται ποτέ θεωρείται ότι γίνεται μηδέν η πίεση P. Αυτό συνεπάγεται ότι τα μόρια του αερίου είναι ακίνητα. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται και **θερμοκρασία απολύτου μηδενός** γιατί παύει κάθε κίνηση.



Σχήμα 1.5. Κατασκευή θερμομετρικής κλίμακας Κέλβιν.

1.5.2. Θερμόμετρα

Τα όργανα που μετρούν την θερμοκρασία ενός σώματος ονομάζονται θερμόμετρα. Η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται ύστερα από αποκατάσταση θερμικής ισορροπίας ανάμεσα στο όργανο και το σώμα και στηρίζεται στην μεταβολή κατά την θέρμανση κάποιων χαρακτηριστικών του σώματος π.χ. διαστάσεις, ηλεκτρική αντίσταση κ.λ.π.

Έτσι διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες θερμόμετρων α) θερμόμετρα διαστολής που βασίζονται στην μεταβολή όγκου ενός σώματος όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του, β) θερμόμετρα αντιστάσεως (θερμίστορς) που βασίζονται στην μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης των συρμάτων, γ) θερμοηλεκτρικά θερμόμετρα, δ) οπτικά θερμόμετρα που βασίζονται στην μεταβολή της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα σώμα όταν αυτό θερμαίνεται.

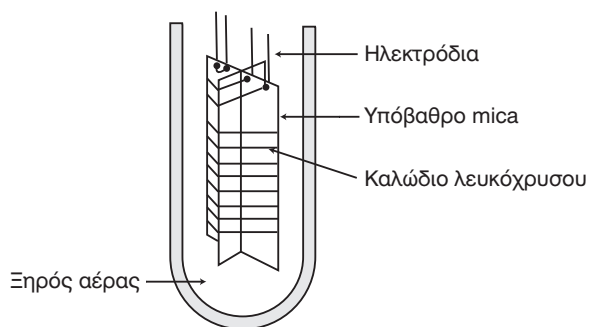
Ιατρικό Θερμόμετρο

Το ιατρικό θερμόμετρο είναι ένα μεγιστοβάθμιο θερμόμετρο υδραργύρου και η λειτουργία του στηρίζεται στην γραμμική διαστολή του υδραργύρου με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αποτελείται από ένα γυάλινο δοχείο σφαιρικού ή κυλινδρικού σχήματος που καταλήγει σε ένα τριχοειδή σωλήνα κατά μήκος του οποίου υπάρχουν οι ενδείξεις θερμοκρασίας. Με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά την θερμομέτρηση ο υδράργυρος που περιέχεται στο δοχείο διαστέλλεται και φθάνει στο τριχοειδή σωλήνα. Μετά το τέλος της θερμομέτρησης ο υδράργυρος αποκόπτεται από μία πολύ μικρή στένωση που υπάρχει στη βάση του σωλήνα. Έτσι συνεχίζει να δείχνει την μέγιστη ένδειξη. Για την επαναφορά του υδραργύρου στο δοχείο χρειάζονται τινάγματα.

Θερμόμετρα αντιστάσεως

Τα θερμόμετρα αντιστάσεως βασίζονται στο γεγονός ότι η αντίσταση ενός υλικού μεταβάλλεται με την θερμοκρασία.

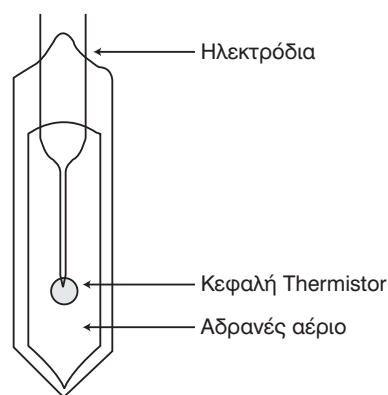
α) **Θερμόμετρα αντιστάσεως λευκόχρυσου.** Το πιο συνηθισμένο μέταλλο που χρησιμοποιείται είναι ο λευκόχρυσος με δυνατότητα θερμομέτρησης από 280°C μέχρι 1300°C. Το σύρμα από λευκόχρυσο είναι περιελγμένο πάνω σε ένα μονωτικό υλικό έτσι ώστε το πηνίο να έχει μηδενική επαγωγή και βρίσκεται μέσα σε ένα σωλήνα σιλικόνης με ξηρό αέρα (Σχ. 1.6). Έτσι επιτυγχάνεται η θερμική επαφή του μετάλλου με το περιβάλλον αλλά αυτό γίνεται ύστερα από ένα χρονικό διάστημα 15 sec. Η εξάρτηση της αντίστασης από την θερμοκρασία για μεγάλο εύρος θερμοκρασίας δίνεται από την $R_t = R_i (1 + At + Bt^2)$ όπου R_i είναι η αντίσταση για $t=0$ και t είναι η θερμοκρασία σε °C. Οι σταθερές A και



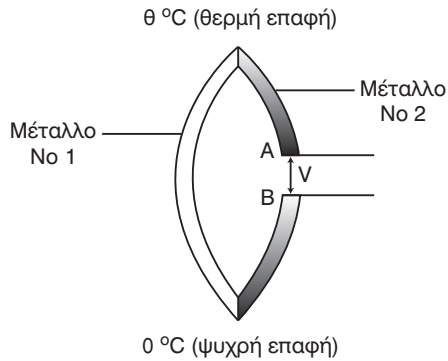
Σχήμα 1.6. Θερμόμετρο αντιστάσεως λευκόχρυσου.

B προσδιορίζονται μετρώντας την αντίσταση σε δύο σημεία γνωστής θερμοκρασίας π.χ. ατμών ύδατος (100°C) και σημείο πήξεως ψευδαργύρου ($t=419.50^\circ\text{C}$). Στην συνέχεια κατασκευάζονται πίνακες που δίνουν την θερμοκρασία σε °C για διάφορες τιμές αντιστάσεως. Η αντίσταση R_t μετρείται με γέφυρα Wheatstone.

β) **Θερμόμετρα ημιαγωγών (Thermistors).** Τα θερμίστορς είναι θερμόμετρα που χρησιμοποιούνται ευρύτερα στην ιατρική και βιολογία. Αποτελούνται από μία πολύ μικρή κεφαλή από ημιαγωγό που καταλήγει σε δύο ηλεκτρόδια. Συνήθως το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ένα μίγμα οξειδίων (π.χ. οξείδιο μαγγανίου, νικελίου, κοβαλτίου, χαλκού και ουρανίου). Το όλο σύστημα μπορεί να είναι τοποθετημένο σε γυάλινο σωλήνα που περιέχει ένα αδρανές αέριο ή και απλώς να περιβάλλεται από γυαλί ή και πλαστικό. Η κεφαλή αυτή είναι τόσο μικρή ώστε μπορεί να τοποθετηθεί στην άκρη μίας υποδερμικής βελόνας για μέτρηση θερμοκρασίας δέρματος (Σχ. 1.7). Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι έχει πολύ μικρό χρόνο αποκρίσεως (0.1 sec) και μπορεί να παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.7. Θερμόμετρο ημιαγωγών (Thermistor).



Σχήμα 1.8. Θερμοζεύγος.

Η αντίσταση του θερμίστορ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η τιμή της μετρείται με γέφυρα Wheatstone και από πίνακες υπολογίζεται η θερμοκρασία.

Θερμοηλεκτρικό θερμομέτρο

Η λειτουργία του θερμοηλεκτρικού θερμομέτρου βασίζεται στο γεγονός ότι όταν δύο διαφορετικά μέταλλα έρθουν σ' επαφή τότε εμφανίζεται μία τάση επαφής που οφείλεται στη μετάβαση μερικών ελεύθερων ηλεκτρονίων από το ένα μέταλλο στο άλλο οπότε υπάρχει έλλειμμα e^- στο ένα και περίσσεια στο άλλο. Εάν τώρα τα σημεία επαφής δύο μετάλλων σ' ένα κύκλωμα βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία τότε η τάση επαφής δεν είναι η ίδια και δημιουργείται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη που είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας $E_\theta = c\Delta\theta$, όπου c είναι ένας συντελεστής θερμοηλεκτρικής τάσεως σε $(V \cdot \text{grad}^{-1})$ (Σχ. 1.8). Συνήθως η μία επαφή βρίσκεται σε πάγο (0°C) και η άλλη στη θερμοκρασία που θέλουμε να μετρήσουμε. Η διαφορά δυναμικού μετρείται με ποτενσιόμετρο (μέθοδος αντισταθμίσεως) ή με μικροβολτόμετρο. Το πιο συνηθισμένο θερμοηλεκτρικό ζεύγος είναι λευκόχρυσος και λευκόχρυσος με 10% ρόδιο.

Το θερμομέτρο αυτό έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα: α) πολύ μικρές διαστάσεις π.χ. αποτελείται από δύο λεπτά σύρματα και β) πολύ γρήγορη απόκριση σε μεταβολές της θερμοκρασίας.

1.5.3. Μέτρηση θερμοότητας (Θερμιδομετρία)

Όταν δύο σώματα διαφορετικής θερμοκρασίας έρθουν σε επαφή τότε ένα ποσό θερμότητας θα μεταφερθεί από το θερμότερο προς το ψυχρότερο μέχρις ότου οι δύο θερμοκρασίες εξισωθούν (θερμική ισορροπία). Η συνολική ενέργεια των δύο σωμάτων διατηρείται δηλαδή το ποσό της ενέργειας, η θερ-

μότητα, που προσφέρθηκε είναι ίση με την ενέργεια που απορροφήθηκε. Η μέτρηση της θερμότητας ονομάζεται **θερμιδομετρία** και γίνεται με τη χρήση ειδικών οργάνων, των θερμιδομέτρων.

Το ποσό της θερμότητας Q που πρέπει να προσφερθεί σε ένα σώμα για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά $\Delta\theta$ βαθμούς δίνεται από την σχέση $Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$ όπου m η μάζα και c η **ειδική θερμότητα**.

Η μονάδα θερμότητας είναι η θερμίδα ή Calorie (cal) και ορίζεται ως το ποσό θερμότητας που απαιτεί 1gr ύδατος για να αυξηθεί η θερμοκρασία του από 14.5°C σε 15.5°C . Ένα cal ισούται με 4,186 J. Συχνά και ειδικά για την θερμιδική αξία των τροφών, χρησιμοποιείται η Cal που είναι ίση με 1000 cal.

Παρατηρούμε ότι στον ορισμό του cal καθορίστηκε και η θερμοκρασία στην οποία συμβαίνει η απορρόφηση της θερμότητας. Η ειδική θερμότητα του ύδατος στους 14.5°C είναι $1 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$ ενώ στους 90°C γίνεται $1.044 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$.

Από μετρήσεις βρέθηκε ότι όλα τα στερεά και υγρά σώματα έχουν ειδική θερμότητα μικρότερη της μονάδας με εξαίρεση το νερό που έχει 1. Η χαρακτηριστική αυτή ιδιότητα του νερού έχει ιδιαίτερη σημασία γιατί η μεγάλη θερμοχωρητικότητα της θάλασσας και των λιμνών ασκεί σημαντική επίδραση στο κλίμα των γειτονικών τόπων. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας της θάλασσας συμβαίνουν πολύ αργότερα από της ξηράς που έχει $c=0.220 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$. Η ειδική θερμότητα εξαρτάται από την φυσική κατάσταση του σώματος: είναι μεγαλύτερη στην υγρή κατάσταση από την στερεά (π.χ. $c_{\text{NEPOY}} = 1 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$, $c_{\text{ΠΑΓΟΥ}} = 0.5 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$).

Επίσης η ειδική θερμότητα αυξάνει με την θερμοκρασία ενώ σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μειώνεται ταχύτατα μέχρις ότου μηδενισθεί στην θερμοκρασία του απολύτου μηδενός.

Τέλος εξαρτάται αντιστρόφως και από την πίεση.

Στα αέρια η θερμοανση του υλικού μπορεί να γίνει υπό σταθερό όγκο ή υπό σταθερή πίεση. Στην τελευταία περίπτωση μέρος της θερμότητας καταναλώνεται για την εκτόνωση του αερίου. Συνεπώς $c_p > c_v$.

Για ένα σώμα που η μάζα του και η ειδική θερμότητα c είναι καθορισμένα, το ποσό της θερμότητας που του προσφέρεται χαρακτηρίζεται απόλυτα από την αύξηση της θερμοκρασίας. Το γινόμενο $m \cdot c$ ονομάζεται **θερμοχωρητικότητα** και εκφράζει το ποσό της θερμότητας που πρέπει να προσφερθεί σε ένα σώμα για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά ένα βαθμό. Παρατηρούμε ότι η θερμοχωρητικότητα είναι μέγεθος που αναφέρεται σε ορισμένο σώμα ενώ η ειδική θερμότητα περιγράφει μία ιδιότητα ενός υλικού.

1.5.4. Διάδοση της θερμότητας

Αν δύο σημεία ενός συστήματος βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες τότε παρατηρείται αυθόρμητη ροή θερμότητας από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα μέχρις ότου επέλθει θερμοκή ισορροπία. Για την αποκατάσταση της ισορροπίας χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα που εξαρτάται από την ταχύτητα διαδόσεως της θερμότητας.

Η διάδοση της θερμότητας γίνεται κυρίως με τρεις τρόπους: με *αγωγή* στα στερεά, υγρά και αέρια και με *μεταφορά* στα υγρά και αέρια και με *ακτινοβολία* σε οποιοδήποτε υλικό μέσο αλλά και στο κενό.

1.5.4.1. Διάδοση με αγωγή

Αν δύο σημεία ενός συστήματος βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία και συνδέονται μεταξύ τους με υλικό μέσο παρατηρείται ροή θερμότητας χωρίς μεταφορά ύλης. Κατά την διάδοση θερμότητας με αγωγή έχουμε άμεση μεταβίβαση ενέργειας με τις κρούσεις των μορίων. Τα μόρια του υλικού που έχουν υψηλότερη θερμοκρασία έχουν και μεγαλύτερη κινητική ενέργεια. Έτσι όταν συγκρούονται με γειτονικά μόρια χαμηλότερης θερμοκρασίας τους μεταφέρουν ένα ποσό ενέργειας με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας των τελευταίων. Ας θεωρήσουμε δύο σημεία ενός συστήματος με θερμοκρασίες T_1 και T_2 ($T_1 > T_2$) που συνδέονται μεταξύ τους. Εάν η θερμοκρασία σε μία διατομή S που βρίσκεται σε απόσταση x από το θερμότερο σημείο είναι T και η θερμοκρασία στην γειτονική διατομή που απέχει dx από την πρώτη είναι $T + dT$, (Σχ. 1.9) τότε το ποσό της θερμότητας Q που διέρχεται από την διατομή σε χρόνο t δίνεται από την σχέση:

$$Q = -kS \frac{dT}{dx} \cdot t \quad (1.11)$$

και η ροή θερμότητας Q/t θα είναι ίση με:

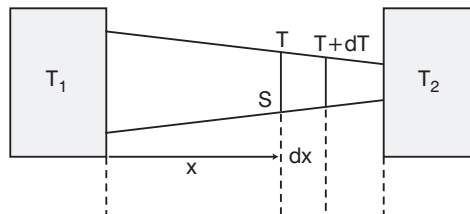
$$\frac{Q}{t} = -kS \frac{dT}{dx} \quad (1.12)$$

Εάν η διατομή S είναι σταθερή η σχέση (1.12) γίνεται:

$$\frac{Q}{t} = -kS \frac{T_2 - T_1}{\ell} \quad (1.13)$$

όπου ℓ η απόσταση των δύο σημείων. Ο k καλείται *συντελεστής θερμοκή αγωγιμότητας* και μετρείται σε $\text{cal s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{grad}^{-1}$.

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η ροή θερμότητας αναφέρεται σε απώλεια ενέργειας του σημείου που βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία. Ο k



Σχήμα 1.9. Διάδοση θερμότητας με αγωγή.

χαρακτηρίζει την ικανότητα αγωγής θερμότητας της ουσίας. Όσο μεγαλύτερος είναι τόσο καλύτερος αγωγός θερμότητας είναι το υλικό. Μικρό συντελεστή θερμοκή αγωγιμότητας έχουν οι μονωτές.

Στα στερεά, στη μετάδοση της θερμότητας με αγωγή συμμετέχουν και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, για αυτό μεγάλος συντελεστής θερμοκή αγωγιμότητας συνεπάγεται και μεγάλο συντελεστή ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Τα υγρά έχουν γενικά χαμηλότερο συντελεστή θερμοκή αγωγιμότητας. Όσο για τα αέρια παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ποικίλει και αυξάνει όσο μειώνει το μοριακό βάρος του αερίου. (Πίν. 1.1.)

1.5.4.2. Διάδοση με μεταφορά

Στα ρευστά ανεξάρτητα από τη διάδοση με αγωγή παρουσιάζεται μία ιδιαίτερη μορφή διάδοσης που ονομάζεται μεταφορά. Όταν ένα ρευστό θερμαίνεται, τα μόρια κοντά στην πηγή θερμότητας αποκτούν ενέργεια και κινούνται απομακρυνόμενα από την πηγή. Έτσι το ρευστό κοντά στην πηγή αραιώνει. Ρευστό από την πυκνότερη περιοχή ρέει προς την αραιότερη προκαλώντας ρεύματα μεταφοράς που μεταφέρουν την θερμότητα μακριά από την πηγή με ταυτόχρονη ροή ύλης.

Πίνακας 1.1. Συντελεστής θερμοκή αγωγιμότητας ($\text{cal s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{grad}^{-1}$)

Αργυρος	1.00	
Χαλκός	0.93	
Χάλυβας	0.10	
Ξύλο	0.0003	
Υαλοβάμβακας	0.0001	
Νερό	0.0014	$\theta = 20^\circ \text{C}$
Ορυκτέλαιο	0.0003	
Υδρογόνο	0.00044	
Αέρας	0.000064	$\theta = 20^\circ \text{C}, P = 1 \text{Atm}$

Εάν ένα στερεό σώμα επιφάνειας S έρθει σ' επαφή με ένα ρευστό, τότε το ποσό της θερμότητας που απάγεται ανά μονάδα χρόνου δίνεται από τη σχέση

$$\frac{Q}{t} = k_c \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.14)$$

όπου S είναι η επιφάνεια που εκτίθεται σε ρεύματα μεταφοράς

T_1, T_2 οι θερμοκρασίες της επιφάνειας και του ρευστού και,

k_c ο συντελεστής μεταφοράς που είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ρευστού.

Ανάλογα με τα αίτια που προκαλούν την μετακίνηση της θερμής μάζας διακρίνουμε την **φυσική ή αυτόματη** και την **εξαναγκασμένη** μεταφορά. Φυσική μεταφορά έχουμε, για παράδειγμα, κατά την θέρμανση του κάτω μέρους ενός δοχείου υγρού. Το θερμό υγρό έχει μικρότερη πυκνότητα και κινείται προς τα πάνω ενώ το ψυχρό μετακινείται προς τα κάτω.

Εξαναγκασμένη μεταφορά έχουμε όταν χρησιμοποιείται κάποιο μηχάνημα που ωθεί τις μάζες του ρευστού π.χ. μία αντλία ή ένα ανεμιστήρα.

Η μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά είναι ταχύτερη από την μετάδοση με αγωγή. Στην ειδική περίπτωση που η θερμότητα δεν μεταδίδεται σε ένα υλικό αλλά από ένα στερεό σ' ένα ρευστό ή το αντίθετο αναφερόμαστε στον όρο **μεταβίβαση της θερμότητας**. Η διάδοση της θερμότητας σ' αυτήν την περίπτωση είναι σύνθετο φαινόμενο και γίνεται με τους δύο προαναφερθέντες τρόπους. Η θερμότητα διαδίδεται με αγωγή από το στερεό στα γειτονικά άτομα του ρευστού και στην συνέχεια με μεταφορά στην υπόλοιπη μάζα του ρευστού.

1.5.4.3. Διάδοση με ακτινοβολία

Η θερμότητα είναι δυνατό να διαδοθεί από ένα σώμα σε ένα άλλο χωρίς να υπάρχει μεταξύ τους ύλη, δηλαδή η θερμότητα διαδίδεται στο κενό.

Ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό φορτίο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Εξ αιτίας της εσωτερικής ενέργειας, τα σωματίδια ή τα μόρια που απαρτίζουν ένα υλικό βρίσκονται σε μία συνεχή κίνηση. Τόσο οι πυρήνες αλλά κυρίως τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια ταλαντώνονται και συνεπώς εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Με αυτό τον τρόπο η εσωτερική ενέργεια μετατρέπεται σε ακτινοβολία που ονομάζεται **θερμική ακτινοβολία**. Λόγω της μείωσης της εσωτερικής ενέργειας το υλικό ψύχεται.

Σύμφωνα με την θεωρία του Plank σε κάθε αρμονικό ταλαντωτή μπορούμε να προσάψουμε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα η ενέργεια του οποίου εί-

ναι ίση με $E = nh\nu$ όπου ν η συχνότητα ταλαντώσεως, h η σταθερά του Plank και n ένας ακέραιος αριθμός. Θεωρούμε λοιπόν ότι τα σώματα σε κάθε θερμοκρασία εκτός από την θερμοκρασία του απολύτου μηδενός εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Το φάσμα θερμικής εκπομπής ενός σώματος δεν αποτελείται από διακριτές φασματικές γραμμές όπως θα περίμενε κανείς αλλά είναι συνεχές. Αυτό συμβαίνει γιατί τα μόρια του σώματος βρίσκονται πολύ κοντά και αλληλοεπηρεάζονται. Η θερμική ακτινοβολία ακολουθεί ορισμένους νόμους που περιγράφονται παρακάτω. Στις σχέσεις αυτές συχνά αναφέρεται το **μέλαν σώμα**. Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται ένα σώμα η επιφάνεια του οποίου απορροφά όλη την ενέργεια που πέφτει επάνω του και δεν ανακλά καθόλου.

Νόμος των Stefan-Boltzmann

Η ισχύς που εκπέμπεται από ένα σώμα με επιφανειακή θερμοκρασία $T^\circ K$ εκφράζεται από τον νόμο των Stefan-Boltzmann.

$$P = \sigma S e T^4 \quad (1.15)$$

όπου P είναι η ισχύς σε W

σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann ίση με $5.7 \times 10^{-8} \text{ Js}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

S είναι η επιφάνεια του σώματος

T είναι η θερμοκρασία του σώματος σε $^\circ K$

e είναι ο συντελεστής εκπομπής που εξαρτάται από την φύση του σώματος ($e = 1$ για μέλαν σώμα).

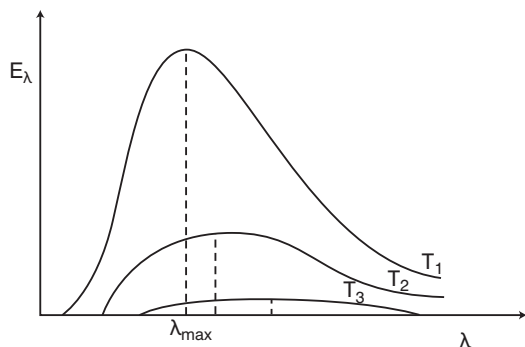
Η παραπάνω σχέση περιγράφει την ακτινοβολούμενη ενέργεια από ένα σώμα θερμοκρασίας $T^\circ K$. Δεν περιγράφει όμως την μεταφορά θερμότητας από ένα θερμότερο σε ένα ψυχρότερο σώμα που είναι μία διαδικασία αμφίδρομη.

Έτσι εάν σώμα θερμοκρασίας T_1 βρίσκεται σε περιβάλλον θερμοκρασίας T_2 η καθαρή μεταφερόμενη ισχύς στο περιβάλλον είναι:

$$P = \sigma e S T_1^4 - \sigma e S T_2^4 = \sigma e S (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.16)$$

Νόμος του Plank

Τα πιο πολλά σώματα ακτινοβολούν ή απορροφούν ακτινοβολία με μία επάρκεια που ποικίλει με το μ. κ. της ακτινοβολίας. Για ένα σώμα και συγκεκριμένο μήκος κύματος ορίζουμε την μονοχρωματική ισχύ E_λ που είναι η ενέργεια που ακτινοβολείται ανά sec και ανά μονάδα επιφάνειας για μήκος κύματος, λ . Η γραφική παράσταση της E_λ μέλανος σώματος σαν συνάρτηση του μήκους κύματος, λ , δίνεται στο σχήμα 1.10. Παρατηρούμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς δεν κατανέμεται ομοιόμορφα αλλά παρου-



Σχήμα 1.10. Γραφική παράσταση του συνεχούς φάσματος του μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες. $T_1 > T_2 > T_3$.

σιάζει ένα μέγιστο σε συγκεκριμένο λ . Η μορφή του φάσματος εξαρτάται από την θερμοκρασία του σώματος. Με την αύξηση της θερμοκρασίας ελαττώνεται το μήκος κύματος που εμφανίζεται η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς, αυξάνει η εκπεμπόμενη ισχύς σε όλα τα μήκη κύματος και ελαττώνεται το μικρότερο μήκος κύματος στο οποίο συμβαίνει εκπομπή (μετάπτωση της καμπύλης προς τα αριστερά).

Νόμος του Wien

Σύμφωνα με τον νόμο του Wien η τιμή του μήκους κύματος που συμβαίνει η μέγιστη εκπομπή, λ_{\max} , είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας του σώματος που ακτινοβολεί. Συγκεκριμένα,

$$\lambda_{\max} \cdot T = C \quad (1.17)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία του σώματος σε $^{\circ}\text{K}$ και C μία σταθερά ίση με $0.29 \text{ cm} \cdot \text{grad}$. Με βάση αυτήν τη σχέση υπολογίζεται η θερμοκρασία κάποιου σώματος που ξέρουμε το λ_{\max} από το φάσμα εκπομπής του (π.χ. $T_{\text{ήλιου}} = 6000 \text{ }^{\circ}\text{K}$).

Επίσης με τον νόμο αυτό εξηγούνται τα διαδοχικά χρώματα του εκπεμπόμενου φωτός ενός θερμαινόμενου σώματος π.χ. ενός ηλεκτρικού λαμπτήρα.

1.5.5. Εφαρμογή των μηχανισμών διάδοσης θερμότητας στην Θερμορύθμιση

Θερμότητα παράγεται συνεχώς στο εσωτερικό του σώματός μας ως τελικό προϊόν της καύσης των τροφών και ως αποτέλεσμα κάθε μυϊκής κίνησης. Η εκτέλεση μηχανικού έργου απαιτεί κατανάλωση πρόσθετης χημικής ενέργειας το μεγαλύτερο μέρος της οποίας (80%) μετατρέπεται τελικά σε θερμότητα. Επιπλέον υπάρχει μία συνεχής ανταλλαγή θερμότητας του ανθρώπου με το περιβάλλον του. Η θερμοκρασία του σώματος πρέπει να παραμένει σταθερή ώστε να διατηρείται ο ρυθμός των βιολογικών εργασιών σε κατάλληλο επίπεδο. Για το σκοπό

αυτό ο άνθρωπος διαθέτει ένα σύνθετο βιολογικό μηχανισμό θερμορύθμισης που ανιχνεύει κάθε θετική ή αρνητική μεταβολή της θερμοκρασίας και ενεργοποιεί τις διαδικασίες που επιτρέπουν τελικά την διατήρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του σώματος στους 37°C . Ένα σημαντικό μέρος αυτού του μηχανισμού αφορά την απαγωγή της περισσείας θερμότητας που παράγεται και αυτό θα περιγράψουμε σε ένα παράδειγμα.

Ένας άνδρας βάρους 70 kg και ύψους 1.60 m , επιφάνειας σώματος 1.7 m^2 βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 21°C . Κατά μία μέση σωματική άσκηση καταναλώνει 260 Cal/h ($1 \text{ Cal/h} = 1000 \text{ cal/h} = 1.16 \text{ W}$). Μετά από 1 ώρα το 80% αυτής της ποσότητας, δηλαδή 208 Cal , μετατρέπεται σε θερμότητα. Αν δεν απάγονταν θα κατέληγε σε αύξηση της θερμοκρασίας σύμφωνα με το νόμο της θερμοχωρητικότητας σε

$$\Delta\theta = Q/m \cdot c = 208.000/70 \cdot 000.1 = 3^{\circ}\text{C}$$

Για να αποδοθεί στο περιβάλλον, η θερμότητα που παράγεται στο εσωτερικό του σώματος πρέπει να φθάσει στο δέρμα. Άρα πρώτη προϋπόθεση είναι να υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο εσωτερικό και στο δέρμα. Πράγματι η θερμοκρασία του δέρματος είναι συνήθως $27\text{-}35^{\circ}\text{C}$ και στο παράδειγμά μας 34°C .

Οι ιστοί, χωρίς αιμάτωση, είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας. Η K_c ιστών είναι $5 \cdot 10^{-4} \text{ cal} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$, άρα ο ρυθμός απαγωγής της θερμότητας για μία απόσταση 3 cm και διαφορά θερμοκρασίας $\Delta\theta = 3^{\circ}\text{C}$ θα ήταν

$$Q/t = k_c \cdot s \cdot \Delta\theta / l = 5 \cdot 10^{-4} \cdot 1.7 \cdot 10^4 \cdot 3 / 3 \cdot 3.600 = 30.6 \text{ Cal/h}$$

που είναι ανεπαρκής. Ευτυχώς επιστρατεύεται άλλη διαδικασία, η οποία είναι με μεταφορά από το κυκλοφορικό σύστημα. Η θερμότητα εισάγεται στα τριχοειδή με αγωγή και στη συνέχεια μεταδίδεται με μεταφορά από το αίμα που κυκλοφορεί στην επιφάνεια του δέρματος. Από εκεί μεταδίδεται στο περιβάλλον με ακτινοβολία, μεταφορά, αγωγή και εξάτμιση.

1. Ακτινοβολία

$$Q/t = 5.7 \cdot 10^{-8} \cdot 1.7 \cdot 1 \cdot (307.15^4 - 294.15^4) \cdot 3600 = 493163 \text{ J/h}$$

$$Q/t = 118 \text{ Cal/h}$$

2. Μεταφορά. Η ποσότητα της θερμότητας που απάγεται με μεταφορά εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα και την εκτιθέμενη επιφάνεια. Θεωρούμε ότι εκτίθεται η μισή επιφάνεια του σώματος. ($K_c = 6 \text{ Cal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$ για ακίνητο αέρα).

$$Q/t = k_c \cdot s \cdot \Delta\theta = 6 \cdot 0.85 \cdot (34 - 21) = 66.3 \text{ Cal/h}$$

3. Με εξάτμιση. Ένα μέρος της ψύξης επιτυγχάνεται με την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του δέρματος και την μεμβράνη που καλύπτει το αναπνευστικό σύστημα, κατά την εκπνοή. Ο μηχανισμός αυτός είναι πολύτιμος σε περιπτώσεις όπου η υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν επιτρέπει την απαγωγή θερμότητας με ακτινοβολία ή μεταφορά, οπότε καθίσταται η κύρια οδός αποβολής θερμότητας. Σε φυσιολογική θερμοκρασία δέρματος η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης είναι 0.580 cal/g. Χωρίς εφίδρωση, το νερό εξατμίζεται από τις δύο οδούς χωρίς να γίνεται αντιληπτό κατά 600 ml/αέρα. Δηλαδή

$$25 \text{ ml/h} \cdot 0.580 = 15 \text{ Cal/h.}$$

4. Με αγωγή στα αντικείμενα που έρχονται σε επαφή με το σώμα π.χ. κάθισμα.

Συνοψίζοντας στο παράδειγμα που αναφέρθηκε

- 1) 208 cal/h μεταφέρονται από το κυκλοφορικό σύστημα στην επιφάνεια του δέρματος και
- 2) αποδίδονται στο περιβάλλον με

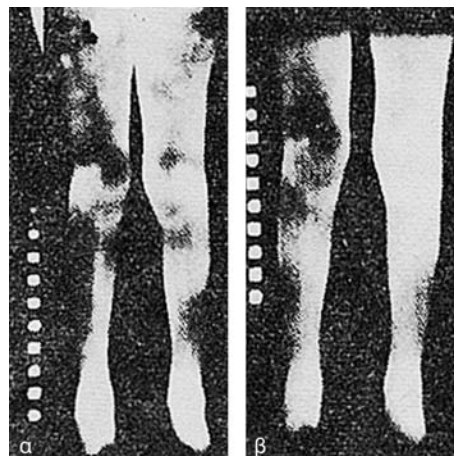
α. ακτινοβολία	118 Cal/h	56.7 %
β. μεταφορά	66 Cal/h	31.7 %
γ. εξάτμιση	15 Cal/h	7.2 %
δ. αγωγή	9 Cal/h	4.3 %

1.5.6. Θερμογραφία

Η **θερμογραφία** είναι μία μέθοδος απεικόνισης της κατανομής θερμοκρασίας διαφόρων περιοχών του σώματος. Η μέθοδος βασίζεται στην ανίχνευση και καταγραφή της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας από το σώμα.

Το δέρμα του ανθρώπινου σώματος συμπεριφέρεται σχεδόν σαν μέλαν σώμα και εκπέμπει θερμική ενέργεια στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας ($\lambda = 10\mu$). Η ισχύς της εκπεμπόμενης ενέργειας είναι ανάλογη της τετάρτης δύναμης της θερμοκρασίας σύμφωνα με τον νόμο των Stefan-Boltzmann. Η θερμοκρασία του δέρματος επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως α) από την ροή του αίματος στο δέρμα άρα και από κάθε αγγειακή μεταβολή, β) από τοπικές αντιδράσεις του δέρματος όπως νέκρωση ή ερυθρότητα, γ) από την θερμότητα που μεταφέρεται στην επιφάνεια του σώματος από τα αιμοφόρα αγγεία ή με αγωγή μέσω των διαφόρων ιστών.

Ο θερμογράφος ανιχνεύει την θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει το σώμα, την μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα το οποίο μετά από ενίσχυση καταγράφεται. Οι θερμικές αντιθέσεις παρουσιάζονται ως αποχρώσεις του φαιού ή σε έγχρωμη κλίμακα. Είναι δυνατόν να ανιχνευθούν διαφορές μέχρι 0.1°C .



Σχήμα 1.11. Θερμογραφία κάτω άκρων ασθενούς με ρευματοειδή αρθρίτιδα. α) Πριν από τη θεραπεία β) Μετά από θεραπεία δυο εβδομάδων

Η θερμογραφία ως διαγνωστική μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για α) Ανίχνευση καρκίνου μαστού γιατί η αυξημένη αιμάτωση προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας β) Παθήσεις περιφερικών αγγείων γιατί οι περιοχές πλημμελούς αιματώσεως παρουσιάζονται ψυχρές και οι περιοχές αυξημένης αιματώσεως θερμές, γ) Παθήσεις που προκαλούν τοπικά φλεγμονή π.χ. ρευματοειδής αρθρίτιδα (Σχ. 1.11).

1.5.7. Θερμοδυναμική

Η θερμοδυναμική είναι το κεφάλαιο εκείνο της φυσικής που ασχολείται με καταστάσεις ισορροπίας, την ενεργειακή διαφορά τους και την κατεύθυνση των πιθανών αλλαγών χωρίς να ενδιαφέρεται για την ταχύτητα με την οποία γίνονται. Μελετά την συμπεριφορά της ύλης χωρίς να εξετάζει την εσωτερική της δομή. Είναι μία μακροσκοπική θεωρία που ιστορικά ξεκίνησε πριν ακόμα γίνει γνωστή η εσωτερική δομή της ύλης από ένα Γάλλο μηχανικό τον Carnot που μελέτησε τις θερμικές μηχανές. Στη συνέχεια και άλλοι ερευνητές όπως ο Clausius, ο Hess και ο Kirchhoff συνέβαλαν στην ανάπτυξη της Κλασικής Θερμοδυναμικής.

Θα αναφέρουμε εδώ ένα παράδειγμα θερμοδυναμικής θεώρησης μιας σχέσης. Είναι γνωστό από την κινητική θεωρία ότι η πίεση ενός αερίου προκαλείται από τις κρούσεις των μορίων του και επίσης ότι αν θερμάνουμε ένα αέριο αυξάνουν οι κρούσεις και συνεπώς και η πίεση. Επίσης είναι γνωστό ότι αν ένα αέριο περιέχεται σε δοχείο με έμβολο και το έμβολο κινηθεί προς τα μέσα, αντίθετα προς τη δύναμη που ασκείται επάνω του από τις κρούσεις, η ενέργεια των μορίων θα αυξηθεί και άρα θα αυξηθεί και η θερμοκρασία. Ξέρουμε δηλαδή ότι αν αυξήσουμε την θερμοκρασία ενός αερίου αυξάνουμε

και την πίεση και ότι αν συμπίεσουμε ένα αέριο αυξάνει η θερμοκρασία του. Είναι δυνατό κανείς με βάση την κινητική θεωρία να εξάγει ποσοτικές σχέσεις ανάμεσα στα δύο αυτά φαινόμενα όπως επίσης και να τα εξετάσει χωρίς να ασχοληθεί καθόλου με τις λεπτομέρειες των κρούσεων με βάση τη σχέση $PV=KT$ όπως γίνεται στην θερμοδυναμική.

1.5.7.1. Θερμοδυναμικά συστήματα – Θερμοδυναμικές συναρτήσεις

Η θερμοδυναμική μελετά ένα σύνολο μάζας και ενέργειας που ονομάζεται «σύστημα». Η ταξινόμηση των θερμοδυναμικών συστημάτων βασίζεται στην ανταλλαγή μάζας και ενέργειας ανάμεσα στο «σύστημα» και το περιβάλλον του.

Τα πιο βασικά συστήματα που εξετάζονται στην θερμοδυναμική είναι τα εξής:

Απομονωμένο είναι το σύστημα που δεν ανταλλάσσει ούτε ενέργεια ούτε ύλη με το περιβάλλον του.

Κλειστό είναι το σύστημα που ανταλλάσσει ενέργεια αλλά όχι ύλη με το περιβάλλον του.

Ανοικτό είναι το σύστημα που ανταλλάσσει και ύλη και ενέργεια με το περιβάλλον του.

Αντικείμενο της θερμοδυναμικής είναι οι μεταβολές στο ενεργειακό περιεχόμενο και την κατανομή της μάζας ενός συστήματος όταν από μία συγκεκριμένη, αρχική κατάσταση πάει σε μία νέα θέση ισορροπίας.

Το ανοικτό σύστημα, σε αντίθεση με τα δύο πρώτα, διατηρείται σε δυναμική ισορροπία. Η σταθερότητα στη σύνθεση της ύλης και στην κατανομή της ενέργειας που χαρακτηρίζει μία κατάσταση ισορροπίας διατηρείται χάρη σε μία συνεχή είσοδο και έξοδο μάζας και ενέργειας από το σύστημα.

Ο ανθρώπινος οργανισμός για παράδειγμα βρίσκεται σε δυναμική ισορροπία εισάγοντας ύλη (τροφές) και αποβάλλοντας τα άχρηστα προϊόντα. Στην πραγματικότητα πρόκειται για μία ψευδο-ισορροπία με διαφορετικά χαρακτηριστικά από την κλασική θερμοδυναμική ισορροπία.

Όταν ένα σύστημα πηγαίνει από μία κατάσταση ισορροπίας σε μία άλλη, η μεταβολή που ακολουθεί μπορεί να είναι αντιστρεπτή ή μη αντιστρεπτή. Αντιστρεπτή ονομάζεται μία μεταβολή όταν μπορούμε να επαναφέρουμε το σύστημα που μεταβλήθηκε στην αρχική του κατάσταση παρέχοντας ενέργεια ίση ακριβώς με αυτή που παράχθηκε από το σύστημα. Μία αντιστρεπτή μεταβολή είναι μία βραδεία ακολουθία διαδοχικών καταστάσεων ισορροπίας.

Για την περιγραφή μιας κατάστασης ισορροπίας και των πιθανών μεταβολών χρησιμοποιούνται ορισμένες θερμοδυναμικές συναρτήσεις που χαρα-

Πραγματική ισορροπία Δυναμική ισορροπία

1. Η σύνθεση του συστήματος παραμένει σταθερή χωρίς να υπάρχει ανταλλαγή μάζας και ενέργειας.

2. Προσθήκη κάποιας ουσίας έχει σαν αποτέλεσμα μία μόνιμη μεταβολή στην συγκέντρωση όλων των συστατικών.

3. Οι νόμοι που περιγράφουν την συμπεριφορά του συστήματος στο σημείο ισορροπίας δεν έχουν όρους που είναι συναρτήσεις του χρόνου.

4. Στην κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας δεν μπορεί να παραχθεί έργο.

Η σύνθεση παραμένει σταθερή χάρη σε μία συνεχή ανταλλαγή ύλης με το περιβάλλον.

Η προσθήκη κάποιας ουσίας προκαλεί μία παροδική μεταβολή στην συγκέντρωση των συστατικών.

Οι νόμοι που περιγράφουν την δυναμική ισορροπία έχουν όρους που εξαρτώνται από τον χρόνο.

Ένα σύστημα σε δυναμική ισορροπία παράγει ωφέλιμο έργο.

κτηρίζουν πλήρως την αρχική και τελική κατάσταση. Οι συναρτήσεις αυτές είναι η *εσωτερική ενέργεια*, η *εντροπία*, η *ενθαλπία* και η *ελεύθερη ενέργεια* ή *ενέργεια του Gibbs*. Η επιλογή των θερμοδυναμικών συναρτήσεων που θα χρησιμοποιηθούν κάθε φορά για την περιγραφή της μεταβολής της ενέργειας εξαρτάται από τις μακροσκοπικές ιδιότητες του συστήματος που εξετάζονται όπως θερμοκρασία, όγκος, πίεση και σύνθεση της ύλης.

Η *ενθαλπία (H)* είναι μία θερμοδυναμική συνάρτηση που ορίζεται από την σχέση

$$H = U + PV \quad (1.18)$$

όπου U είναι η εσωτερική ενέργεια του συστήματος. Από φυσική άποψη η μεταβολή της ενθαλπίας εκφράζει την θερμότητα που απορροφάται ή εκλύεται σε μία μεταβολή που γίνεται υπό σταθερή πίεση. Για τον λόγο αυτό η ενθαλπία περιγράφεται και ως θερμικό περιεχόμενο ενός συστήματος και κάθε μεταβολή της μπορεί να μετρηθεί μ' ένα θερμοιδόμετρο. Σε μία εξώθερμη αντίδραση που εκλύεται θερμότητα στο περιβάλλον η μεταβολή της ενθαλπίας είναι αρνητική ($\Delta H < 0$), ενώ σε μία ενδόθερμη η μεταβολή είναι θετική ($\Delta H > 0$).

Ελεύθερη ενέργεια ή ενέργεια του Gibbs (G) είναι το μέρος εκείνο της ολικής ενέργειας του συστήματος που μπορεί να διατεθεί για την παραγωγή

έργου. Η διαφορά της ελεύθερης ενέργειας, ΔG , ανάμεσα σε δύο καταστάσεις του συστήματος ισούται με το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί όταν το σύστημα ακολουθεί αντιστρεπτή μεταβολή. Αυτό αποτελεί ένα θεωρητικό μέγιστο γιατί οι συνηθισμένες μεταβολές είναι μη αντιστρεπτές και η ελεύθερη ενέργεια μικρότερη.

Σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας όπου το σύστημα δεν μπορεί να παράγει έργο, η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας ΔG ισούται με το μηδέν. Σε κάθε άλλη μεταβολή το μέγεθος του ΔG εκφράζει το βαθμό απομάκρυνσης από την κατάσταση ισορροπίας.

Η εντροπία (S) είναι μία θερμοδυναμική συνάρτηση χωρίς όμως κάποιο φυσικό ανάλογο όπως η ενθαλπία. Ορίζεται ως λόγος Q/T όπου Q η θερμότητα και T η θερμοκρασία.

Σε μία αντιστρεπτή μεταβολή ο λόγος Q/T παραμένει σταθερός δηλαδή όσο Q/T απορροφάται σ' ένα σημείο της μεταβολής τόσο Q/T αποδίδεται κάπου αλλού. Δεχόμαστε ότι η τιμή της εντροπίας ορίζεται από την κατάσταση του συστήματος και η διαφορά ΔS σε μία μεταβολή είναι ίση με το άθροισμα των επί μέρους στοιχειωδών μεταβολών εντροπίας που παίρνει το σύστημα κατά τα διαδοχικά βήματα εκτελώντας αντιστρεπτή μεταβολή ανάμεσα στις δύο καταστάσεις.

Ας θεωρήσουμε ένα απομονωμένο σύστημα που αποτελείται από δύο σώματα θερμοκρασίας T_1 και T_2 ($T_2 > T_1$) και ότι αυτά τα σώματα έρχονται σε θερμική επαφή. Άρα η θερμοκρασία τους τείνει να εξισωθεί με τη μεταφορά ενός ποσού θερμότητας $\Delta\Theta$ από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα σε μία, μη αντιστρεπτή μεταβολή. Η εντροπία του ψυχρού σώματος θα αυξηθεί κατά:

$$\Delta S_1 = \frac{\Delta\Theta}{T_1}$$

και του θερμόμετρου θα μειωθεί κατά:

$$\Delta S_2 = \frac{\Delta\Theta}{T_2}$$

Επειδή $T_2 > T_1$ θα έχουμε $\Delta S_1 > \Delta S_2$. Δηλαδή η αύξηση της εντροπίας θα είναι μεγαλύτερη από την μείωση και συνεπώς η εντροπία του συστήματος θα αυξηθεί.

Η εντροπία λοιπόν ενός απομονωμένου συστήματος που μεταβάλλεται θα αυξάνει μέχρις ότου συμβεί ενεργειακή ισορροπία οπότε δεν θα έχουμε καμία μεταβολή. Η κατάσταση ισορροπίας χαρακτηρίζεται από την μέγιστη τιμή εντροπίας του συστήματος. Η ισορροπία αυτή αφορά κάθε μορφή

ενέργειας π.χ. θερμική, χημική κ.λ.π.

Σε ένα κλειστό σύστημα που βρίσκεται σ' αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του η εντροπία μπορεί ν' αυξάνει ή να μειώνεται ανάλογα με την μεταβολή.

Οι τρεις θερμοδυναμικές συναρτήσεις που αναφέρθηκαν, σε κλειστό σύστημα, συνδέονται με τη σχέση $\Delta H - T\Delta S = \Delta G$.

1.5.7.2. Θερμοδυναμικά αξιώματα

Τα συμπεράσματα της θερμοδυναμικής διατυπώνονται στα τρία θερμοδυναμικά αξιώματα. Οι σχέσεις που περιγράφονται εφαρμόζονται στη μελέτη των νόμων της Φυσικοχημείας και της συμπεριφοράς των θερμικών μηχανών.

A' Αξίωμα. Έστω ότι έχουμε ένα σύστημα με εσωτερική ενέργεια U_1 . Αν προσδώσουμε σ' αυτό θερμότητα Q , τότε ένα μέρος αυτής θα δαπανηθεί για την παραγωγή έργου W από το σύστημα και η διαφορά $Q - W$ θα εγκλεισθεί στο σύστημα με αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας.

Στη νέα κατάσταση η εσωτερική ενέργεια U_2 θα είναι ίση με

$$U_2 = U_1 + (Q - W), \quad U_2 - U_1 = Q - W \quad \text{ή} \quad \Delta U = Q - W \quad (1.19)$$

Η σχέση (1.19) αποτελεί την μαθηματική διατύπωση του α' θερμοδυναμικού αξιώματος σύμφωνα με το οποίο κατά τη μετάβαση ενός συστήματος από μία κατάσταση σε μία άλλη η θερμότητα που προσλαμβάνει (ή αποδίδει) το σύστημα και το παραγόμενο (ή προσφερόμενο) έργο είναι δυνατό να είναι κάθε φορά διαφορετικά, ανάλογα με τον δρόμο που ακολουθήθηκε, και μόνο η διαφορά τους δηλαδή η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας είναι σταθερή.

B' Αξίωμα. Το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα αφορά την μετατροπή της θερμότητας σε έργο. Παρατηρούμε ότι ενώ είναι δυνατό να μετατραπεί το έργο σε θερμότητα σε μία θερμοκρασία π.χ. με την τριβή, είναι αδύνατο να συμβεί το αντίστροφο.

Το συμπέρασμα του Carnot από την μελέτη των θερμικών μηχανών που αποτελεί και την διατύπωση του β' θερμοδυναμικού αξιώματος είναι ότι δεν υπάρχει καμία μηχανή που να μπορεί να μετατρέψει την θερμότητα σε έργο σε μία θερμοκρασία.

Το μέγιστο έργο W που παράγεται όταν θερμότητα Q μεταφέρεται από ένα σώμα θερμοκρασίας T_1 σε ένα άλλο θερμοκρασίας T_2 ($T_1 > T_2$) δεν εξαρτάται μόνο από την διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = T_1 - T_2$ αλλά και από την θερμοκρασία της θερμής πηγής.

$$W = Q \left[\frac{T_1 - T_2}{T_1} \right] \quad (1.20)$$

$$\text{και } \eta = \frac{W}{Q} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1.21)$$

όπου η ο συντελεστής αποδόσεως.

Γ' Αξίωμα. Σύμφωνα με το τρίτο θερμοδυναμικό αξίωμα στην θερμοκρασία του απολύτου μηδενός η εντροπία κάθε υλικού που βρίσκεται σε κρυσταλλική μορφή είναι μηδέν. Στην θερμοκρασία αυτή δεν υπάρχει καμία κίνηση.

1.5.7.3. Εφαρμογή της θερμοδυναμικής στη μελέτη βιολογικών συστημάτων

Η θερμοδυναμική χρησιμοποιείται στη μελέτη των βιοχημικών και βιολογικών μεταβολών του σώματος κάνοντας την παραδοχή ότι αυτές γίνονται σε σταθερή πίεση (ατμοσφαιρική) και σταθερή θερμοκρασία, δηλαδή θεωρώντας τον ανθρώπινο οργανισμό ως κλειστό σύστημα.

Ένα θέμα που εξετάζεται από θερμοδυναμική σκοπιά είναι οι ενεργειακές μεταβολές που παρατηρούνται στον οργανισμό.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η πιο σημαντική πηγή ενέργειας του ανθρώπινου οργανισμού είναι η χημική ενέργεια που δίνουν οι τροφές. Αυτή η ενέργεια μετασχηματίζεται με βιοχημικές αντιδράσεις σε έργο απαραίτητο για τις λειτουργίες του σώματος. Επίσης είναι δυνατό ο οργανισμός να μετατρέψει τα χημικά συστατικά σε μία πιο άμεσα χρησιμοποιήσιμη χημική μορφή, την τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP).

Το κύτταρο εξαρτάται από την ATP γιατί αποτελεί άμεση πηγή χημικής ενέργειας για την παραγωγή χημικού και φυσικού έργου. Ο βιοχημικός μηχανισμός του σώματος χρησιμοποιεί την εξώθερμη αντίδραση ελευθέρωσης φωσφορικής ομάδας από την ATP ($\Delta G > 0$) για να πραγματοποιήσει άλλες αντιδράσεις που απαιτούν ενέργεια. Ο υπολογισμός της ενέργειας που ελευθερώνεται σ' αυτές τις αντιδράσεις ενδιαφέρει ιδιαίτερα.

Παρακάτω θ' αναφερθεί ένα τέτοιο παράδειγμα από την υδρόλυση της ATP. Λόγω της σπουδαιότητας της αντίδρασης έχουν γίνει πολλές προσπάθειες να μετρηθούν οι τιμές των ΔG , ΔH και ΔS αυτής της αντίδρασης σε φυσιολογικές τιμές θερμοκρασίας και pH.

Σ' ένα τέτοιο υπολογισμό στους 309°K (36°C)

και pH 7 παρουσία ιόντων Mg υπολογίστηκε ότι ήταν $\Delta H = -20.080 \text{ J mol}^{-1}$ και $\Delta S = 35,21 \text{ J grad}^{-1}$.

Για τον υπολογισμό της ελεύθερης ενέργειας ΔG χρησιμοποιείται η σχέση $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$. $\Delta G = 20.080 - (309 \cdot 35,21) \text{ J mol}^{-1}$ $\Delta G = 9,2 \text{ kJ mol}^{-1}$.

1.5.7.4. Θερμοδυναμική μη αντιστρεπτών μεταβολών

Με την κλασική θερμοδυναμική μπορεί να περιγραφεί η κατεύθυνση των βιολογικών διαδικασιών καθώς και να χαρακτηρισθούν ποσοτικά οι διάφορες καταστάσεις ισορροπίας θεωρώντας τις τιμές των φυσικών ποσοτήτων που αναφέρονται σαν στατιστικό μέσο όρο. Εξαίρεση αποτελούν τα πολύ μικρά συστήματα όπου οι διακυμάνσεις των επιμέρους τιμών γίνονται σημαντικές.

Στην κατεύθυνση αυτή έχει αναπτυχθεί η «θερμοδυναμική μη αντιστρεπτών μεταβολών» που ασχολείται με καταστάσεις απώλειας ενέργειας, διακυμάνσεων, ακόμα και ξαφνικών μετατροπών προς πιο σύνθετες και ανομοιογενείς δομές. Ο ποσοτικός προσδιορισμός τέτοιων μεταβολών είναι δυνατός, μέχρι σήμερα, μόνο για απλές περιπτώσεις και όχι για τις σύνθετες που συμβαίνουν στα βιολογικά συστήματα. Παρ' όλες όμως τις δυσκολίες που υπάρχουν αυτή την στιγμή πρέπει να πούμε ότι η μελέτη ενός βιολογικού συστήματος με τις νέες σχέσεις που προκύπτουν από τη θερμοδυναμική των μη αντιστρεπτών μεταβολών που το αντιμετωπίζει σαν ένα ανοικτό σύστημα είναι πιο σωστή και σ' ορισμένες περιπτώσεις η μόνη εφαρμόσιμη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αλεξόπουλος Κ. Δ.: Γενική φυσική Τόμος 4^{ος} Θερόμης Αθήνα 1962.
2. Feynman R.P, Leighton R.B, Sands M: The Feynman Lectures on Physics Addison-Wesley Publishing Co 13rd ed. 1979.
3. Holwill M. E. J. Silvester N. R.: Introduction to Biological Physics. John Wiley and sons London 1973.
4. Sears F. W. and Zemansky M. W.: College Physics. Part I. 3rd ed. Addison Wesley Publ. Co. 1971.
5. Davidovits P. 1975. Physics in Biology and Medicine Prentice-Hall Inc N. Jersey.