

ΠΕΙΡΑΜΑ VII-α

Ηλεκτρικό Ισοδύναμο της Θερμότητας

Σκοπός πειράματος

Στο πείραμα αυτό θα μετρήσουμε το ηλεκτρικό ισοδύναμο της ενέργειας δηλαδή τη σχέση μεταξύ ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Θα εξετάσουμε λοιπόν πειραματικά τα εξής:

- Τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική.
- Τη σχέση μεταξύ των μονάδων Joule και cal.

Θεωρητικό υπόβαθρο

- Θερμότητα, Θερμιδομετρία
- Βασική εξίσωση Θερμιδομετρίας
- Ενέργεια, Μετατροπή μεταξύ διαφορετικών μορφών ενέργειας.

Για την κατανόηση και σωστή τέλεση του πειράματος θα πρέπει υποχρεωτικά να γνωρίζετε πριν κάνετε το πείραμα τη θεωρία που παρουσιάζεται στις ακόλουθες ενότητες του βιβλίου Φυσική των Serway & Jewett: **Θ1.1, Θ1.2, Θ1.3, Θ2.1, Θ2.2.**

Συνοπτική Θεωρία

Η θερμοδυναμική άπτεται μεταξύ άλλων και της μελέτης φαινομένων που σχετίζονται με τη μεταφορά ενέργειας από ένα σώμα σε ένα άλλο ή από ένα σώμα προς το περιβάλλον. Η ενέργεια αυτή αποκαλείται για ιστορικούς λόγους «θερμότητα» και η συνήθης μονάδα μέτρησής της είναι η **θερμίδα (calorie=cal)**. Η θερμίδα ορίστηκε πειραματικά ως το ποσό θερμότητας το οποίο απαιτείται για να ανεβάσουμε τη θερμοκρασία 1 gr αποσταγμένου νερού από τους 14.5 στους 15.5 βαθμούς Celsius. Σκοπός τους συγκεκριμένου πειράματος είναι να υπολογίσουμε την ενέργεια 1 cal σε Joule, να βρούμε δηλαδή το ηλεκτρικό ισοδύναμο της θερμότητας.

Όπως αναφέρουμε πιο αναλυτικά στο Πείραμα «Θερμιδομετρία και Θερμοστοιχεία» η μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο σωμάτων γίνεται πάντοτε από το θερμό (δηλαδή το σώμα με την πιο υψηλή θερμοκρασία) προς το ψυχρό σώμα, και μόνο εφόσον τα σώματα βρίσκονται σε θερμική επαφή. Μετά από την παρέλευση ενός χρονικού διαστήματος το οποίο εξαρτάται από το πόσο εύκολη είναι η ροή θερμότητας ανάμεσά τους, τα δύο σώματα έρχονται σε θερμική ισορροπία και αποκτούν την ίδια θερμοκρασία. Αν ένα σώμα είναι μονωμένο δε μπορεί να χάσει η να προσλάβει θερμότητα/ενέργεια από το περιβάλλον.

Το ποσό της ενέργειας το οποίο απαιτείται για να αυξήσουμε τη θερμοκρασία ενός σώματος είναι ανάλογο της μάζας του και εξαρτάται από το υλικό από το οποίο αποτελείται. Ορίζουμε ως ειδική θερμότητα (c), ενός υλικού το ποσό θερμότητας το οποίο απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία της μονάδας μάζας του υλικού κατά ένα βαθμό. Οι μονάδες μέτρησης του c είναι το $cal/(gr\ ^\circ K)$ ή $kcal/(kgr\ ^\circ K)$.

Με βάση τον ορισμό της θερμίδας, η ειδική θερμότητα του αποσταγμένου νερού είναι $c_{νερού}=1\ cal/(gr\ ^\circ K)$.

Το γινόμενο της μάζας ενός σώματος επί την ειδική του θερμότητα ονομάζεται θερμοχωρητικότητα (mc) του σώματος και οι μονάδες μέτρησής της είναι $cal/^\circ K$. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αν έχουμε ένα ομογενές σώμα μάζας m , για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του κατά ΔT βαθμούς θα πρέπει να του δοθεί ή αφαιρεθεί ποσό θερμότητας ΔQ ίσο με:

$$\Delta Q = mc\Delta T$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η **Βασική Εξίσωση της Θερμιδομετρίας** η οποία συσχετίζει μεταβολές θερμοκρασίας με το ποσό θερμότητας που προσφέρεται ή αφαιρείται από κάποιο σώμα.

Με βάση την παραπάνω εξίσωση ορίζεται και το **ισοδύναμο νερού** ενός σώματος, δηλαδή η μάζα αποσταγμένου νερού που έχει την ίδια θερμοχωρητικότητα με το υπό μελέτη σώμα.

Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης

Για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιούμε τη διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Βασικό τμήμα της είναι ένα **θερμιδόμετρο** μέσα στο οποίο βρίσκεται μία αντίσταση R . Το **θερμιδόμετρο** είναι μια συσκευή παρόμοια με το γνωστό θερμός, η οποία έχει πολύ καλή μόνωση και περιορίζει σημαντικά τις απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον (Σχήμα 2). Στο σκέπασμα του θερμιδομέτρου είναι πακτωμένη η αντίσταση. Το θερμιδόμετρο περιέχει απιονισμένο νερό μέσα στο οποίο είναι εμβαπτισμένη η αντίσταση.

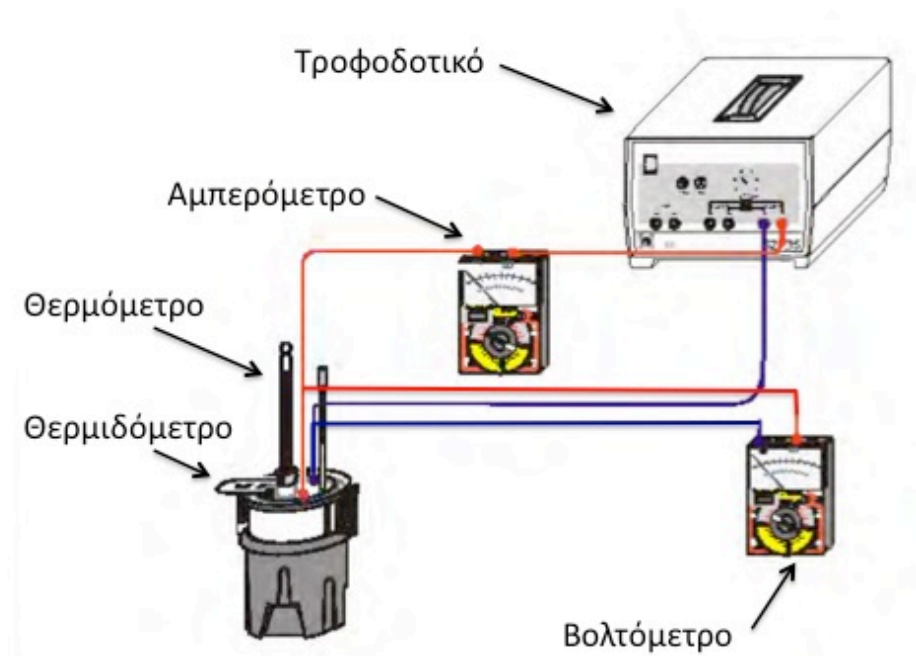
Στα άκρα της αντίστασης εφαρμόζεται τάση V με αποτέλεσμα να διαρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I . Η ηλεκτρική ισχύς $P=IV$ μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση. Το ηλεκτρικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στη Σχήμα 3. Μετά από χρόνο t η ηλεκτρική ενέργεια που έχει μετατραπεί σε θερμότητα είναι:

$$W = Pt \Rightarrow W = IVt$$

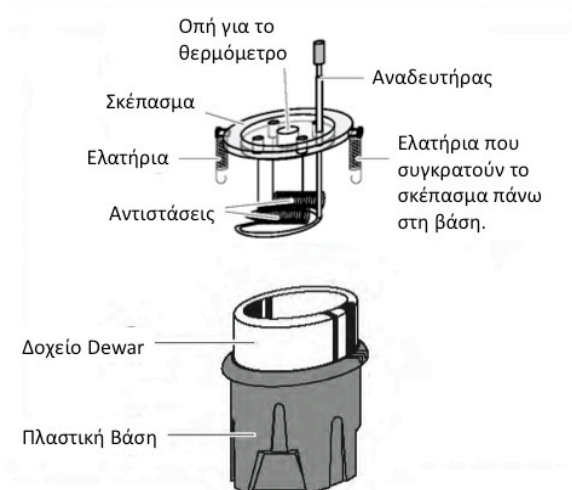
Κατά συνέπεια όλη η θερμότητα που παράγεται από την αντίσταση απορροφάται από το νερό ανεβάζοντας τη θερμοκρασία του κατά ΔT , αλλά και από τα τοιχώματα του θερμιδομέτρου η θερμοκρασία των οποίων επίσης αυξάνει κατά ΔT , αφού το σύστημα είναι σε θερμική ισορροπία. Επομένως, κάθε χρονική στιγμή θα ισχύει ότι:

$$W = \Delta Q \Rightarrow W = (m_v c_v + m_\theta c_\theta) \Delta T \quad (1)$$

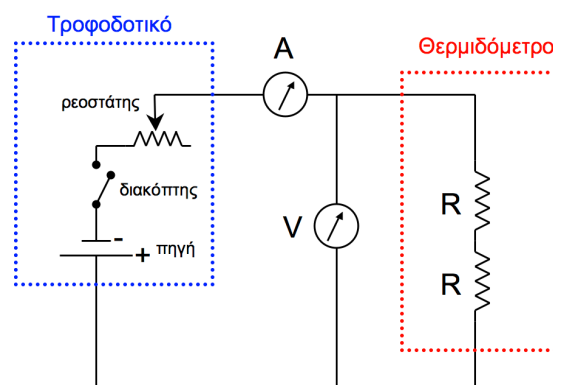
όπου $m_{\theta}c_{\theta}$ η θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου, m_v και c_v η μάζα και η ειδική θερμότητα του νερού και W η ηλεκτρική ενέργεια η οποία μετατράπηκε σε θερμότητα από την αντίσταση R .



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη. Παρουσιάζονται τα βασικά όργανα που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα.



Σχήμα 2. Σχηματικό διάγραμμα του θερμιδομέτρου.



Σχήμα 3. Το ηλεκτρικό κύκλωμα.

Πειραματική Διαδικασία

Από την εξίσωση (1) παρατηρούμε ότι για να υπολογίσουμε την τιμή του λόγου

$$J = \frac{W}{\Delta Q} \text{ ο οποίος έχει μονάδες Joule/cal και είναι το ηλεκτρικό ισοδύναμο της}$$

θερμότητας αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου. Η διαδικασία που ακολουθούμε περιγράφεται αναλυτικά στο πείραμα «Θερμιδομετρία και Θερμοστοιχεία» αλλά επαναλαμβάνεται για λόγους πληρότητας και εδώ. (Σε περίπτωση που έχετε ήδη κάνει το πείραμα «Θερμιδομετρία και Θερμοστοιχεία» και έχετε μετρήσει τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου χρησιμοποιείτε την τιμή που βρήκατε εκεί.).

Η θεωρητική τιμή του ηλεκτρικού ισοδύναμου τη θερμότητας είναι 4,186 Joule/cal. Προφανώς εάν τα W και Q είναι εκφρασμένα στις ίδιες μονάδες θα έχουμε J=1.

Α' Μέρος: Μέτρηση ειδικής Θερμότητας Θερμιδομέτρου

Έστω ότι έχουμε ένα θερμιδόμετρο το οποίο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με νερό μάζας m_2 και θερμοκρασίας θ_2 . Εάν προσθέσουμε σε αυτό θερμό νερό μάζας m_1 και θερμοκρασίας θ_1 , θερμότητα από το θερμό νερό θα μεταφερθεί στο ψυχρό έως ότου φθάσουν σε θερμική ισορροπία με τελική θερμοκρασία θ_t . Εφόσον το σύστημα είναι μονωμένο από το περιβάλλον θα ισχύει ότι:

$$m_1 c_v (\theta_1 - \theta_t) = (m_2 c_v + m_{\theta} c_{\theta}) (\theta_t - \theta_2) \quad (2)$$

όπου $c_v = 1 \text{ cal/(gr } ^\circ\text{K)}$ η ειδική θερμότητα του νερού.

Για να μετρήσουμε τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου $m_{\theta} c_{\theta}$ αρκεί να εφαρμόσουμε τη σχέση (2) σε δύο γνωστές μάζες νερού, m_1 και m_2 , με την ακόλουθη διαδικασία:

1. Ζυγίζουμε το θερμιδόμετρο κενό, μαζί όμως με το σκεπασμά του. Καταγράφουμε τη μάζα του m_{θ} .
2. Τοποθετούμε μέσα στο θερμιδόμετρο το ψυχρό νερό, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και το ζυγίζουμε. Αφαιρώντας τη μάζα του θερμιδομέτρου μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα m_2 του ψυχρού νερού.
3. Περιμένουμε να έρθει το νερό σε θερμική ισορροπία με το θερμιδόμετρο και μετράμε τη θερμοκρασία του συστήματος (θ_2).
4. Χρησιμοποιώντας ένα βραστήρα θερμαίνουμε μια νέα ποσότητα νερού μέχρι η θερμοκρασία του να φτάσει περίπου στους 45°C .
5. Όταν η θερμοκρασία του νερού στο βραστήρα φτάσει στη επιθυμητή τιμή, καταγράφουμε τη θερμοκρασία του θερμού νερού (θ_1) και αμέσως χύνουμε μια ποσότητα μέσα στο θερμιδόμετρο. Η ποσότητα του θερμού νερού θα πρέπει να είναι παρόμοια με την ποσότητα του ψυχρού νερού που υπάρχει ήδη στο θερμιδόμετρο. Χρησιμοποιούμε τον αναδευτήρα για να αναμειχθούν οι δύο ποσότητες νερού.

- Όταν το σύστημα έρθει και πάλι σε θερμική ισορροπία, μετράμε την τελική θερμοκρασία (θ_τ), και ξαναζυγίζουμε το θερμιδόμετρο. Η διαφορά με την προηγούμενη μέτρηση της μάζας θα μας δώσει την μάζα του θερμού νερού m_1 .
- Προσέξτε να κάνετε τη μεταφορά γρήγορα ώστε να μην χαθεί θερμότητα στο περιβάλλον και βεβαιωθείτε ότι η τελική θερμοκρασία δε μεταβάλλεται.
- Σημειώστε τις μετρήσεις σας σε πίνακα της μορφής:

Πίνακας 1

Μάζα Θερμιδομέτρου $m_\theta \pm \delta m_\theta$ (gr)	
Μάζα Θερμιδομέτρου με ψυχρό νερό (gr)	
Μάζα Θερμιδομέτρου με ψυχρό και θερμό νερό (gr)	
Μάζα θερμού νερού: $m_1 \pm \delta m_1$ (gr)	
Μάζα ψυχρού νερού: $m_2 \pm \delta m_2$ (gr)	
Θερμοκρασία θερμού νερού: $\theta_1 \pm \delta \theta_1$ ($^\circ\text{C}$)	
Θερμοκρασία ψυχρού νερού: $\theta_2 \pm \delta \theta_2$ ($^\circ\text{C}$)	
Τελική θερμοκρασία συστήματος: $\theta_\tau \pm \delta \theta_\tau$ ($^\circ\text{C}$)	

- Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις σας λύστε τη σχέση (2) ως προς $m_\theta c_\theta$ και υπολογίστε τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου.
- Χρησιμοποιώντας τη θεωρία διάδοσης σφαλμάτων υπολογίστε το πιθανό σφάλμα $\delta(m_\theta c_\theta)$ στη μέτρηση της θερμοχωρητικότητας του θερμιδομέτρου.

Β' Μέρος: Μέτρηση του ηλεκτρικού ισοδύναμου της θερμότητας

Έχοντας πλέον μετρήσει τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου ακολουθήστε τα παρακάτω βήματα:

- Συνδέστε τις δύο αντιστάσεις, οι οποίες βρίσκονται πακτωμένες στο καπάκι του θερμιδομέτρου, κατά σειρά και στη συνέχεια συνδέστε τις με το τροφοδοτικό, το βολτόμετρο και το αμπερόμετρο, σύμφωνα με το ηλεκτρικό κύκλωμα του Σχήματος 2.
- Τοποθετήστε στο θερμιδόμετρο νερό μάζας m , ώστε να γεμίσει περίπου μέχρι την μέση, και το οποίο έχει θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Μετρήστε η θερμοκρασία του νερού θ_a όταν έχει φθάσει σε θερμική ισορροπία με το θερμιδόμετρο.
- Κλείστε το ηλεκτρικό κύκλωμα. Ρυθμίζουμε το τροφοδοτικό ώστε η ένταση του ρεύματος να είναι περίπου 1.5A, και η τάση να είναι περίπου 2V. Το ρεύμα που ρέει από την αντίσταση R τη θερμαίνει και η θερμότητα που εκλύεται απορροφάται από το σύστημα.

5. Καταγράψετε σε ένα πίνακα της μορφής που ακολουθεί τη θερμοκρασία του νερού του θερμιδομέτρου κάθε δύο λεπτά (120sec) και την τάση V και ένταση I του ηλεκτρικού ρεύματος σε τακτά διαστήματα, (πχ κάθε φορά που η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 5 βαθμούς).

Πίνακας 2

$t \pm \delta t$ (sec)	$I \pm \delta I$ (A)	$V \pm \delta V$ (Volt)	$\theta \pm \delta \theta$ (°C)	$\Delta T = \theta - \theta_0$ (°C)	$\Delta Q \pm \delta(\Delta Q)$ (cal)	$W \pm \delta W$ (Joule)
	I_1	V_1	θ_1	ΔT_1	ΔQ_1	W_1
	I_2	V_2	θ_2	ΔT_2	ΔQ_2	W_2
...

6. Προσέξτε να αναδεύετε περιοδικά το νερό με τον αναδευτήρα του θερμιδομέτρου ώστε να αποκτά όλο ομοιόμορφη θερμοκρασία.
7. Πάρτε μετρήσεις για τουλάχιστον 25 λεπτά.
8. Παρατηρήστε ότι οι τιμές της έντασης και τάσης του ρεύματος δε μεταβάλλονται.
9. Εφαρμόζοντας τη θεωρία διάδοσης των σφαλμάτων υπολογίστε το σφάλμα $\delta(\Delta Q)$ και δW για καθεμιά από τις μετρήσεις σας.
10. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα κάνετε μια γραφική παράσταση της ηλεκτρικής ενέργειας (W) που δίνεται στο σύστημα νερού-θερμιδομέτρου ως συνάρτηση της θερμότητας (ΔQ) που έχει απορροφηθεί από αυτό.
11. Προσαρμόστε μια ευθεία ελαχίστων τετραγώνων ($W = a + \beta \Delta Q$) και υπολογίστε τη διατομή (a), την κλίση (β), και τα σφάλματά τους.
12. Ποιο είναι το ηλεκτρικό ισοδύναμο της θερμότητας από την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων ($J_1 \pm \Delta J_1$);
13. Υπολογίστε την συνολική ηλεκτρική ενέργεια $W_{ολ}$ που δίνεται στο σύστημα νερού-θερμιδομέτρου κατά τη διάρκεια του πειράματος καθώς και την συνολική θερμότητα ($\Delta Q_{ολ}$) που έχει απορροφηθεί από αυτό. Χρησιμοποιώντας αυτές τις δύο τιμές υπολογίστε το ηλεκτρικό ισοδύναμο της θερμότητας ($J_2 \pm \Delta J_2$);
14. Πως συγκρίνονται οι δύο αυτές μετρήσεις σας με τη θεωρητική τιμή $J_0 = 4,186 \text{ Joule/cal}$;
15. Ποιά από τις δύο προηγούμενες μεθόδους δίνει την ακριβέστερη τιμή για το ηλεκτρικό ισοδύναμο;

Ερωτήσεις

- 1) Στο πείραμα υποθέτουμε ότι δεν έχουμε απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Στην πράξη όμως πάντοτε έχουμε απώλειες. Εξηγήστε πώς αυτές

επηρεάζουν τον υπολογισμό του ηλεκτρικού ισοδύναμου της θερμότητας. Μας οδηγούν να το υπερεκτιμήσουμε ή να το υποεκτιμήσουμε;

- 2) Χρησιμοποιώντας τη θεωρία διάδοσης σφαλμάτων γράψτε τους τύπους που μας δίνουν το πιθανό σφάλμα $\delta(\Delta Q)$, δW , και δJ βάση των μετρήσεων που κάνατε και των σφαλμάτων τους.
- 3) Ποιά είναι η φυσική σημασία της διατομής στην εξίσωση $W=\alpha+\beta\Delta Q$;
- 4) Ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμότητα γίνεται στα σημεία σύνδεσης των τεσσάρων ακροδεκτών στο κάλυμμα του θερμιδόμετρου και κατά συνέπεια δεν θερμαίνει το νερό. Τι συνέπεια έχει αυτό στην τιμή του J που υπολογίζετε; Εάν η ολική αντίσταση των σημείων σύνδεσης είναι 0.02Ω ενώ η καθεμία από τις δύο αντιστάσεις που συνδέετε σε σειρά είναι 1Ω , υπολογίστε το εκατοστιαίο συστηματικό σφάλμα που κάνατε.

Βιβλιογραφία

Serway R. A. & Jewett J.W., Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς, 8^η Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

Instruction Sheet 386 48 (Electric Calorimeter Attachment), LD Didactic GmbH