

ΠΕΙΡΑΜΑ VIIIα

Θερμιδομετρία, Λανθάνουσα θερμότητα τήξης

Σκοπός πειράματος

Στο πείραμα αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τις βασικές αρχές της θερμιδομετρίας προκειμένου να μετρήσουμε τα εξής:

- Ειδική θερμότητα θερμιδομέτρου.
- Λανθάνουσα Θερμότητα τήξης του πάγου.

Θεωρητικό υπόβαθρο

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

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 Φυσικής των Serway & Jewett: **Θ1, Θ2.1, Θ2.2, Θ2.3, Θ3**

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 ($\text{calorie}=\text{cal}$). 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 $\text{cal}/(\text{gr } ^\circ\text{K})$ ή $\text{kcal}/(\text{kgr } ^\circ\text{K})$. Το γινόμενο της μάζας ενός σώματος επί την ειδική του θερμότητα ονομάζεται **θερμοχωρητικότητα** (mc) του σώματος και οι μονάδες μέτρησής της είναι $\text{cal}/^\circ\text{K}$.

Αντίστοιχα μπορούμε να ορίσουμε ως **ατομική θερμότητα (C)** ανά γραμμομόριο ενός υλικού υπό σταθερό όγκο, $C = \left. \frac{dE}{dT} \right|_V$, το ποσό θερμότητας το οποίο απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός γραμμομορίου του υλικού κατά ένα βαθμό. Οι μονάδες μέτρησης του C είναι το $cal/(mole \text{ } ^\circ K)$ ή $kcal/(kmole \text{ } ^\circ K)$.

Υπενθυμίζεται ότι 1 mole είναι η ποσότητα υλικού η οποία περιέχει αριθμό στοιχείων (ατόμων ή μορίων) του υλικού ίσο με τον αριθμό Avogadro ($N_A = 6.022 \times 10^{23}$).

Σε μικροσκοπική κλίμακα η αύξηση της θερμοκρασίας ενός σώματος λόγω μεταφοράς θερμότητας σε αυτό, οφείλεται σε αύξηση της κινητικής ενέργειας των ατόμων ή μορίων του υλικού από το οποίο αποτελείται το σώμα. Μπορεί να αποδειχθεί ότι σε ένα ιδανικό μονατομικό αέριο κάθε άτομο έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας και η μέση κινητική ενέργεια κάθε ατόμου είναι ίση με $(3/2)kT$, όπου k η σταθερά Boltzmann, η οποία σχετίζεται με τον αριθμό Avogadro (N_A) και την παγκόσμια σταθερά των αερίων, $R = 1.986 \text{ cal}/(mole \text{ } ^\circ K)$, με τη σχέση :

$$k = \frac{R}{N_A} = 3.30 \times 10^{-24} \text{ cal}/^\circ K$$

Για ένα ιδανικό μονατομικό αέριο μπορεί να αποδειχθεί ότι η ατομική του θερμότητα είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται, και δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{3}{2} R = 2.98 \text{ cal}/(mole \text{ } ^\circ K)$$

Αν το αέριο δεν είναι μονατομικό, τα μόριά του θα έχουν περισσότερους από τρεις βαθμούς ελευθερίας και η ατομική του θερμότητα θα είναι μεγαλύτερη².

Στην περίπτωση των στερεών η κατάσταση είναι διαφορετική. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι η ατομική τους θερμότητα (και κατά συνέπεια η θερμοχωρητικότητα τους) εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Όταν η θερμοκρασία πλησιάζει το απόλυτο μηδέν τότε και η ατομική τους θερμότητα τείνει στο μηδέν με διαφορετικό ρυθμό για κάθε στερεό. Για σχετικά υψηλές θερμοκρασίες όμως ($T \sim 400\text{-}500 \text{ } ^\circ K$) **η ατομική θερμότητα σχεδόν όλων των στερεών είναι σταθερή** και ίση με την τιμή:

$$C = 3R = 5.96 \text{ cal}/(mole \text{ } ^\circ K)$$

Το πειραματικό αποτέλεσμα αυτό είναι γνωστό και ως νόμος των Dulong-Petit³.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αν έχουμε ένα ομογενές σώμα μάζας m , το οποίο αποτελείται από n mole υλικού με ατομικό βάρος AB^4 , για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του κατά ΔT βαθμούς θα πρέπει να του δοθεί ή αφαιρεθεί ποσό θερμότητας ΔQ ίσο με:

² Για περισσότερες πληροφορίες δείτε την παράγραφο 21.3 και Πίνακα 21.2 στο βιβλίο του Serway (Τόμος III).

³ Εξαιρέση στο νόμο αυτό αποτελούν στερεά με ελαφριά άτομα (αυτά που έχουν πυρήνες με μικρό μαζικό αριθμό) τα οποία έχουν ισχυρούς κρυσταλλικούς δεσμούς όπως το μεταλλικό βηρύλλιο ($Z=8$) και ο άνθρακας ($Z=12$) στη μορφή του διαμαντιού. Για περισσότερες πληροφορίες δείτε την παράγραφο 21.6 στο βιβλίο του Serway (Τόμος III).

⁴ Υπενθυμίζεται ότι το ατομικό βάρος ενός υλικού σε γραμμάρια είναι ίσο με την μάζα του υλικού δια τον αριθμό των mole που περιέχει.

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

όπου c είναι η ειδική θερμότητα του υλικού.

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.

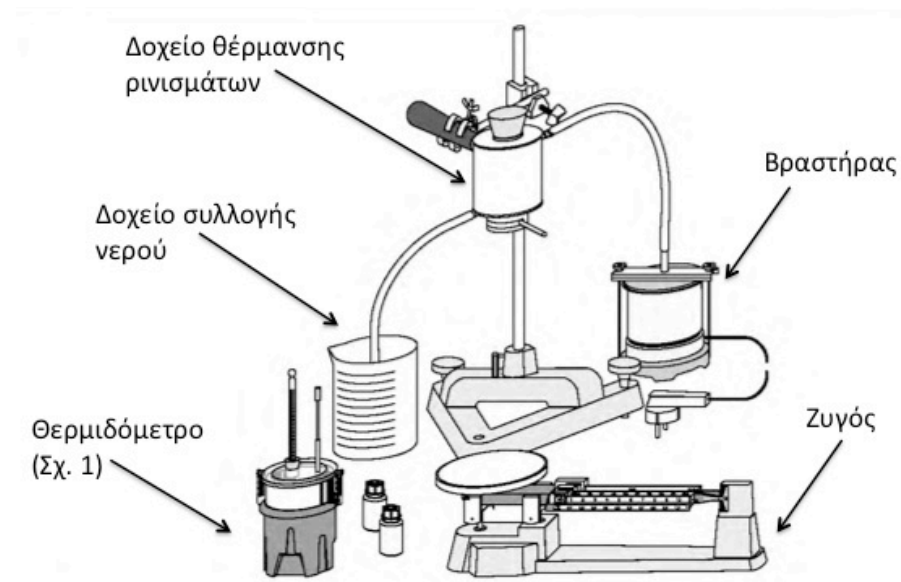
Πειραματική Διαδικασία

Α' Μέρος: Μέτρηση της ειδικής θερμότητας του χαλκού (Cu)

Σε αυτό το μέρος του πειράματος θα μετρήσουμε τη ειδική θερμότητα (c) ρινισμάτων χαλκού με τη μέθοδο των μιγμάτων. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στο γεγονός ότι αν φέρουμε σε επαφή δύο σώματα διαφορετικής θερμοκρασίας μέσα σε ένα σύστημα το οποίο είναι θερμικά μονωμένο από το περιβάλλον θα υπάρξει μεταφορά θερμότητας (ενέργειας) από το θερμό στο ψυχρό σώμα. Η μεταφορά θα συνεχιστεί έως ότου τα σώματα έρθουν σε θερμική ισορροπία και εξισωθούν οι θερμοκρασίες τους. Αν c_1 και c_2 είναι η ειδική θερμότητα των δύο σωμάτων μάζας m_1 και m_2 , θ_1 και θ_2 οι αρχικές τους θερμοκρασίες, και θ_r η κοινή τελική θερμοκρασία και υποθέσουμε ότι το σώμα 1 είναι το θερμότερο ($\theta_1 > \theta_2$) τότε από την αρχή διατήρησης της ενέργειας συνεπάγεται ότι:

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 \Rightarrow m_1 c_1 (\theta_1 - \theta_r) = m_2 c_2 (\theta_r - \theta_2) \quad (1)$$

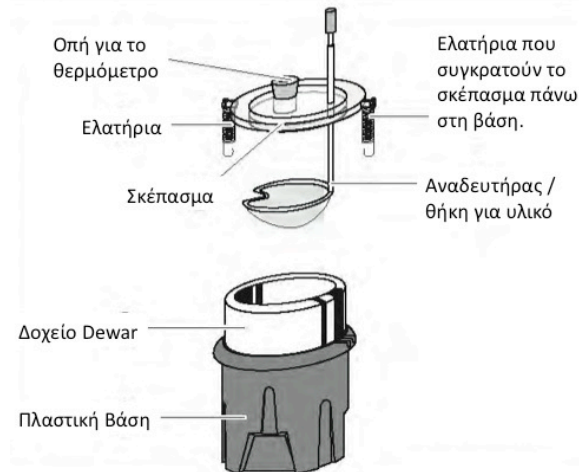
όπου ΔQ_1 η θερμότητα που έχασε το σώμα 1 και ΔQ_2 η θερμότητα που απορρόφησε το σώμα 2 και φυσικά $\theta_1 > \theta_r > \theta_2$.



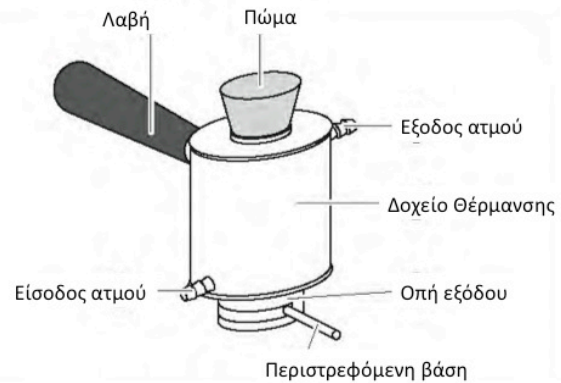
Σχήμα 1.

Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.

Παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί στο πείραμα.



Σχήμα 2. Το θερμιδόμετρο.



Σχήμα 3. Δοχείο θέρμανσης.

Εάν είναι γνωστή η ειδική θερμότητα του ενός σώματος και μετρηθούν τόσο οι μάζες των δύο σωμάτων όσο και οι αρχικές και τελική θερμοκρασία, τότε από την (1) μπορούμε να υπολογίσουμε την ειδική θερμότητα του άλλου σώματος.

Στο πείραμα θα χρησιμοποιήσουμε το νερό ως το ψυχρό σώμα (2) μάζας m_2 με τη γνωστή ειδική θερμότητα c_2 , μια που αυτή εξ'ορισμού είναι $1 \text{ cal}/(\text{gr } ^\circ\text{K})$. Το θερμό σώμα (1) του οποίου την ειδική θερμότητα επιθυμούμε να υπολογίσουμε είναι ο χαλκός (Cu). Φέρνουμε το νερό και το χαλκό σε θερμική επαφή μέσα σε ένα **θερμιδόμετρο**.

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 (δείτε Σχήμα 2).

Αν το θερμιδόμετρο αρχικά βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το νερό που περιέχει ($\theta_\theta = \theta_2$) και μια που τα μέρη του τα οποία βρίσκονται σε επαφή με το νερό θα απορροφήσουν ένα μέρος της θερμότητας που θα χάσει ο χαλκός, η εξίσωση (1) πρέπει να μετατραπεί σε:

$$m_1 c_1 (\theta_1 - \theta_\tau) = (m_2 c_2 + m_\theta c_\theta) (\theta_\tau - \theta_2) \quad (2)$$

όπου ο όρος $m_\theta c_\theta$ είναι η θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου.

Α' Μέρος: Υπολογισμός της θερμοχωρητικότητας του θερμιδομέτρου

Παρατηρούμε όμως ότι η ποσότητα $m_{\theta}c_{\theta}$ η οποία απαιτείται για τον υπολογισμό της c_1 από τη σχέση (2) είναι άγνωστη⁵. Για να την μετρήσουμε αρκεί να εφαρμόσουμε τη σχέση (2) σε δύο γνωστές μάζες νερού, m_1 και m_2 , με την ακόλουθη διαδικασία:

1. Μετράμε τη μάζα του κενού θερμιδομέτρου m_{θ} χρησιμοποιώντας την ψηφιακή ζυγαριά.
2. Προσθέτουμε μια ποσότητα ψυχρού νερού, θερμοκρασίας περιβάλλοντος, και και μετρούμε τη μάζα του θερμιδομέτρου εκ νέου. Η διαφορά με την προηγούμενη μέτρηση θα μας δώσει τη μάζα του ψυχρού νερού m_2 .
3. Κλείνουμε το θερμιδομέτρο και περιμένουμε να έρθει σε θερμική ισορροπία. Μετράμε τη θερμοκρασία του συστήματος (θ_2) όταν αυτή σταθεροποιηθεί.
4. Χρησιμοποιώντας ένα βραστήρα θερμαίνουμε νέα ποσότητα νερού.
5. Μετράμε τη θερμοκρασία του (θ_1), και προσθέτουμε μια ποσότητα από το θερμό νερό στο θερμιδομέτρο. Χρησιμοποιήστε τον αναδευτήρα για να αναμειχθούν οι δύο ποσότητες νερού. Όταν το σύστημα έρθει σε θερμική ισορροπία μετράμε την τελική θερμοκρασία του (θ_{τ}).

Προσέξτε να κάνετε τη μεταφορά γρήγορα ώστε να μην χαθεί θερμότητα στο περιβάλλον και βεβαιωθείτε ότι η τελική θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται.

6. Μετρούμε τη μάζα του θερμιδομέτρου μαζί με το νερό. Η διαφορά με την προηγούμενη μέτρηση θα μας δώσει τη μάζα του θερμού νερού m_1 .
7. Σημειώστε τις μετρήσεις σας στον ακόλουθο πίνακα:

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: $\theta_1 \pm \delta \theta_1$ (°C)	
Θερμοκρασία ψυχρού νερού: $\theta_2 \pm \delta \theta_2$ (°C)	
Τελική θερμοκρασία συστήματος: $\theta_{\tau} \pm \delta \theta_{\tau}$ (°C)	

8. Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις σας και αφού γνωρίζετε ότι $c_1=c_2=c_v=1 \text{ cal/(gr } ^{\circ}\text{K)}$ λύστε τη σχέση (2) ως προς $m_{\theta}c_{\theta}$ και υπολογίστε τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου.

⁵ Σε περίπτωση που έχετε ήδη κάνει το πείραμα «Ηλεκτρικό Ισοδύναμο της Θερμότητας» και έχετε μετρήσει τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου χρησιμοποιήστε την τιμή που βρήκατε εκεί.

9. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία διάδοσης σφαλμάτων υπολογίστε το πιθανό σφάλμα $\delta(m_{\theta}c_{\theta})$ στη μέτρηση της θερμοχωρητικότητας του θερμιδομέτρου.

Β' Μέρος: Μέτρηση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης (λ) του πάγου

Κατά τη διάρκεια της τήξης ενός σώματος, όταν δηλαδή μετατρέπεται από την στερεά στην υγρή φάση, η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή παρά το ότι το σώμα απορροφά θερμότητα. Αυτό συμβαίνει διότι η ενέργεια που απορροφάται καταναλώνεται στο να σπάσουν οι δεσμοί ανάμεσα στα άτομα/μόρια του υλικού οι οποίοι τα διατηρούν σε καθορισμένες θέσεις μέσα στο υλικό γύρω από τις οποίες εκτελούν μικρές ταλαντώσεις. Μετά την αλλαγή φάσης τα άτομα/μόρια του υλικού μπορούν να κινηθούν στο χώρο με τις γνωστές ιδιότητες ενός ρευστού.

Η θερμότητα (ενέργεια) που απαιτείται για να τακεί η μονάδα μάζας ενός υλικού το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία τήξης ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα τήξης (λ)⁶. Οι μονάδες μέτρησής της λανθάνουσας θερμότητας τήξης είναι *cal/gr* ή *kcal/kg*.

Σε αυτό το μέρος του πειράματος θα υπολογίσουμε τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης του πάγου. Προσθέτουμε σε ένα θερμιδόμετρο το οποίο ήδη περιέχει νερό μάζας m_v σε αρχική θερμοκρασία περιβάλλοντος (θ_a), μία ποσότητα πάγου μάζας m_{π} η οποία βρίσκεται σε θερμοκρασία τήξης ($\theta_{\pi} = 0^{\circ}\text{C} = 273^{\circ}\text{K}$). Ενέργεια θα μεταφερθεί από το νερό και το θερμιδόμετρο στον πάγο ο οποίος θα αλλάξει φάση (θα λιώσει) και θα μετατραπεί σε νερό θερμοκρασίας 0°C . Στη συνέχεια το σύστημα του αρχικού νερού, του πάγου που μετατράπηκε σε νερό, και του θερμιδομέτρου θα φτάσει σε θερμική ισορροπία έχοντας θερμοκρασία θ_{τ} . Λόγω της διατήρησης ενέργειας από τη σχέση (2) θα έχουμε:

$$m_{\theta}c_{\theta}(\theta_a - \theta_{\tau}) + m_v c_v (\theta_a - \theta_{\tau}) = m_{\pi} \lambda + m_{\pi} c_v (\theta_{\tau} - \theta_{\pi}) \quad (3)$$

Τα βήματα τα οποία ακολουθούμε για να κάνουμε τη μέτρηση είναι:

1. Τοποθετούμε μέσα στο θερμιδόμετρο γνωστής θερμοχωρητικότητας $m_{\theta}c_{\theta}$, νερό μάζας m_v και θερμοκρασίας περιβάλλοντος και αφού έρθει σε θερμική ισορροπία με το θερμιδόμετρο μετράμε τη θερμοκρασία (θ_a). Η μέτρηση της μάζας του νερού γίνεται κατά τα γνωστά μετρώντας πρώτα τη μάζα του άδειου θερμιδομέτρου.
2. Θρυμματίζουμε πάγο σε πολύ μικρά κομμάτια.
3. Τοποθετούμε τον πάγο στο θερμιδόμετρο, κλείνουμε το κάλυμμα του θερμιδομέτρου και κάνοντας χρήση του αναδευτήρα ανακινούμε το νερό ώστε να λιώσει ο πάγος.
4. Όταν η θερμοκρασία του θερμιδομέτρου σταθεροποιηθεί καταγράφουμε τη θερμοκρασία ισορροπίας του συστήματος (θ_{τ}).

⁶ Για περισσότερες πληροφορίες δείτε την παράγραφο 20.3 στο βιβλίο του Serway (Τόμος III).

5. Μετράμε τη μάζα του συστήματος ώστε να υπολογίσουμε τη μάζα του πάγου που προσθέσαμε (m_{π}).
6. Σημειώστε τις μετρήσεις σας στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 3

Μάζα Θερμιδομέτρου $m_{\theta} \pm \delta m_{\theta}$ (gr)	
Μάζα Θερμιδομέτρου με νερό (gr)	
Μάζα Θερμιδομέτρου με νερό και πάγο (gr)	
Μάζα νερού $m_v \pm \delta m_1$ (gr)	
Μάζα πάγου $m_{\pi} \pm \delta m_{\pi}$ (gr)	
Αρχική θερμοκρασία νερού $\theta_a \pm \delta \theta_a$ ($^{\circ}\text{C}$)	
Τελική θερμοκρασία νερού $\theta_{\tau} \pm \delta \theta_{\tau}$ ($^{\circ}\text{C}$)	

7. Επιλύοντας τη σχέση (3) ως προς λ και χρησιμοποιώντας τις παραπάνω μετρήσεις καθώς και ότι $c_v=1 \text{ cal}/(\text{gr } ^{\circ}\text{K})$, υπολογίστε τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης του πάγου.
8. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία διάδοσης σφαλμάτων υπολογίστε το πιθανό σφάλμα $\Delta(\lambda)$ στη μέτρηση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης.
9. Συμφωνεί η μέτρησή σας με τη γνωστή θεωρητική τιμή $\lambda=79.71 \text{ cal/gr}$;

Ερωτήσεις

- 1) Γνωρίζετε ότι η ειδική θερμότητα του νερού είναι $1 \text{ cal}/(\text{gr } ^{\circ}\text{K})$. Ποια είναι η ειδική θερμότητα του πάγου; (Σημείωση: δεν είναι το ίδιο με το νερό σε υγρή φάση).
- 2) Εξηγήστε γιατί το γεγονός ότι θρυμματίζετε τον πάγο διασφαλίζει ότι η θερμοκρασία του πάγου είναι σχεδόν 0°C
- 3) Συγκρίνετε την ενέργεια που απαιτείται για να λιώσει 1gr πάγου θερμοκρασίας 0°C και να γίνει νερό θερμοκρασίας 0°C , με αυτήν που απαιτείται για να θερμάνουμε το 1gr νερού 0°C στον 1°C .

Βιβλιογραφία

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

Leybold Physics Leaflet P2.3.2.1, Leybold Didactic GmbH

Leybold Physics Leaflet P2.3.4.1, Leybold Didactic GmbH

Leybold Instruction Sheet 386 48, Leybold Didactic GmbH