



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Υλικά Ι

Ενότητα 7: Θερμικές Ιδιότητες

Δημήτρης Παπάζογλου
Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται στην άδεια χρήσης **Creative Commons** και ειδικότερα

*Αναφορά - Μη εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγο Έργο v. 3.0
(Attribution – Non Commercial – Non-derivatives)*



- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.

Χρηματοδότηση

·Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.

·Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.

·Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΥΛΙΚΑ Ι

ΠΑΡΟΝ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

7

Θερμικές Ιδιότητες

Θερμικές ιδιότητες

Θερμοχωρητικότητα

Θερμική διαστολή

Θερμική αγωγιμότητα

Θερμική τάση

Θερμοχωρητικότητα

Η θερμοχωρητικότητα εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον

προσφερόμενη
θερμότητα

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

$$\frac{J}{\text{mole} \cdot K}$$

μεταβολή
θερμοκρασίας

Θερμοχωρητικότητα
ανά μονάδα μάζας

Ειδική θερμότητα

$$c = \frac{C}{m}$$

$$C_V = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_V$$

υπό σταθερό όγκο

$$C_P = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_P$$

υπό σταθερή πίεση

Γενικά: $C_P > C_V$

C_V

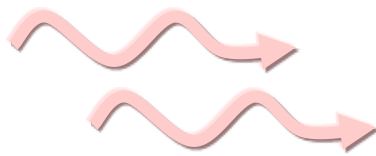
Όλη η απορροφούμενη θερμότητα οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας

C_P

Μέρος της απορροφούμενης θερμότητας ξοδεύεται στην αύξηση του όγκου

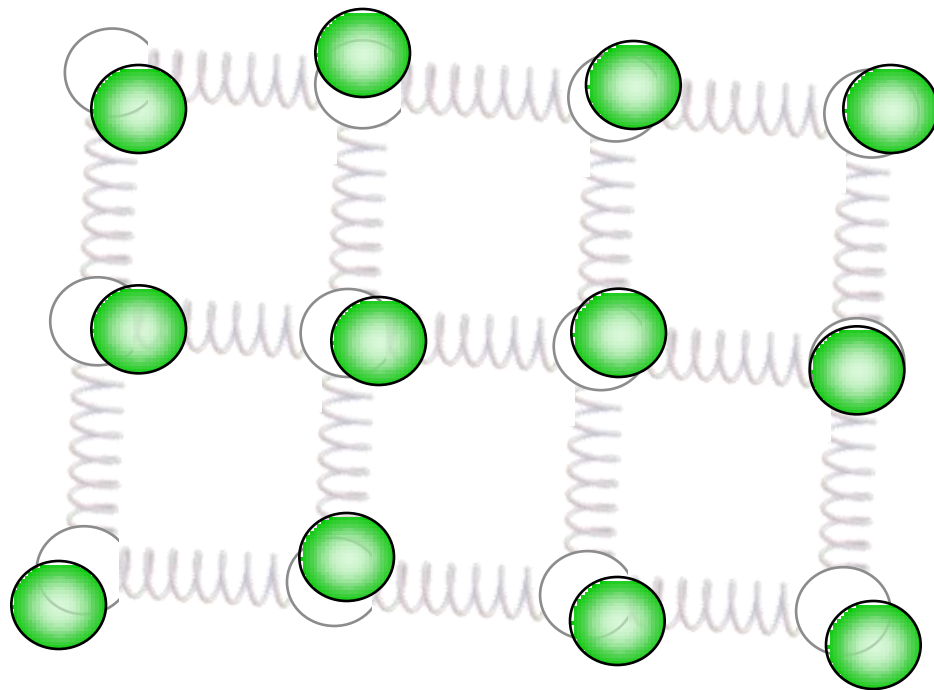
Θερμοχωρητικότητα – ατομική κλίμακα

Θερμική
ενέργεια



Αύξηση της
θερμοκρασίας

Αύξηση της
δονητικής ενέργειας



Φωνόνια

κβαντισμένη
δονητική ενέργεια

*Ελαστικά κύματα στο
κρυσταλλικό πλέγμα με
μεγάλη συχνότητα &
μικρό μήκος κύματος*

Θερμικές ιδιότητες

Φωνόνια

$$k = 6\pi/6a \quad \lambda = 2.00a \quad \omega_k = 2.00\omega$$



$$k = 5\pi/6a \quad \lambda = 2.40a \quad \omega_k = 1.93\omega$$



$$k = 4\pi/6a \quad \lambda = 3.00a \quad \omega_k = 1.73\omega$$



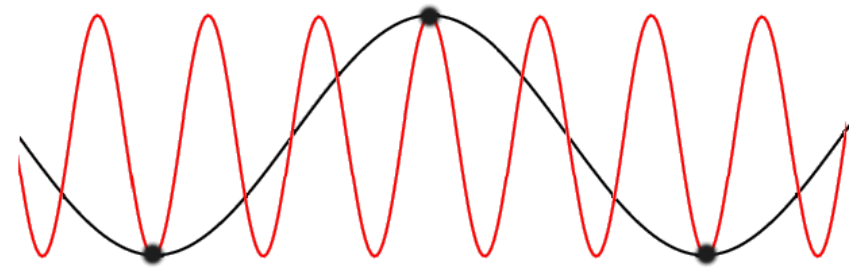
$$k = 3\pi/6a \quad \lambda = 4.00a \quad \omega_k = 1.41\omega$$



$$k = 2\pi/6a \quad \lambda = 6.00a \quad \omega_k = 1.00\omega$$



$$k = \pi/6a \quad \lambda = 12.00a \quad \omega_k = 0.52\omega$$



Ακουστικά φωνόνια σε 1D κρυσταλλικό πλέγμα,

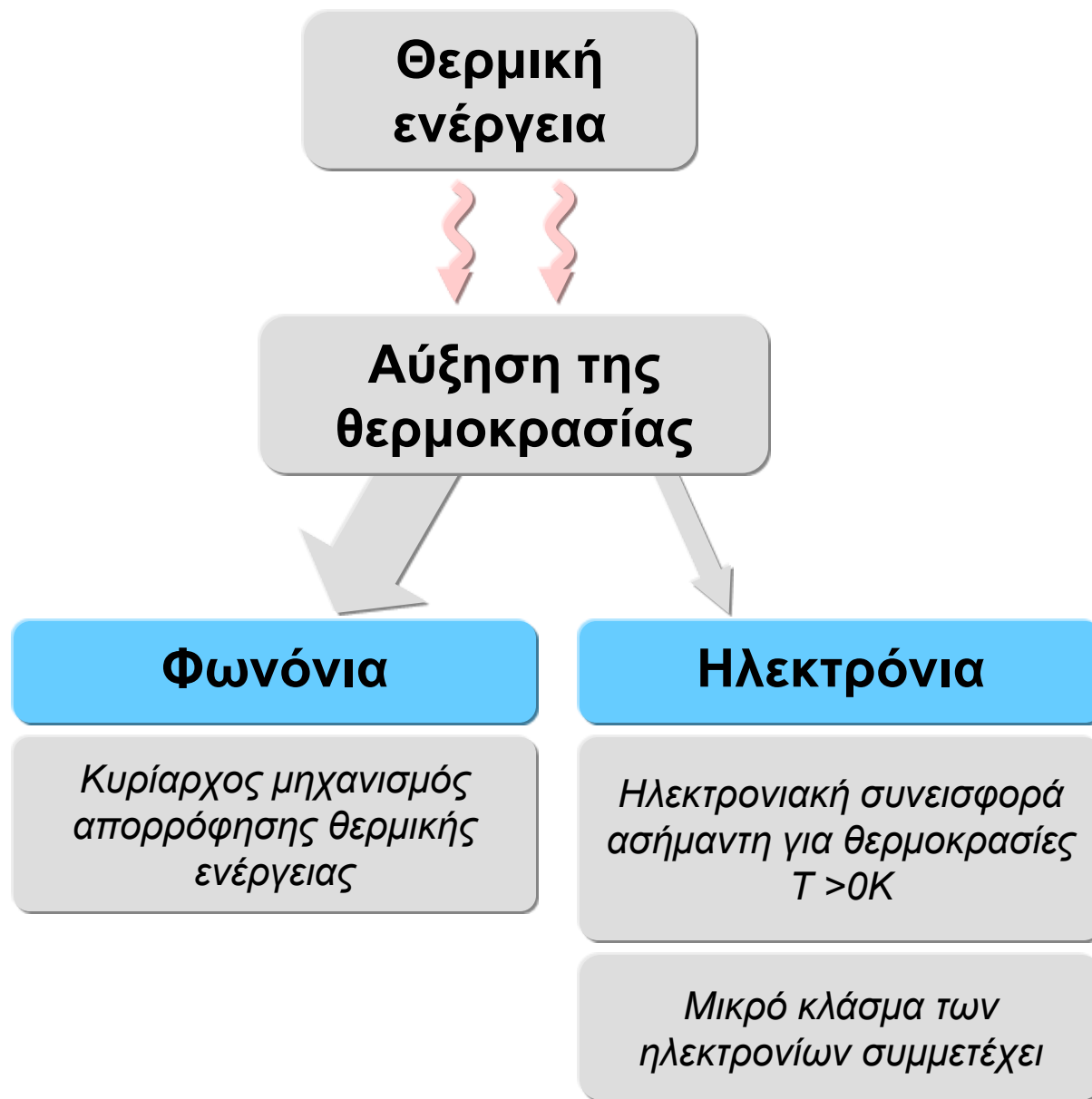
© User: Greg L / Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0

Οπτικά φωνόνια 1D κρυσταλλικό πλέγμα,

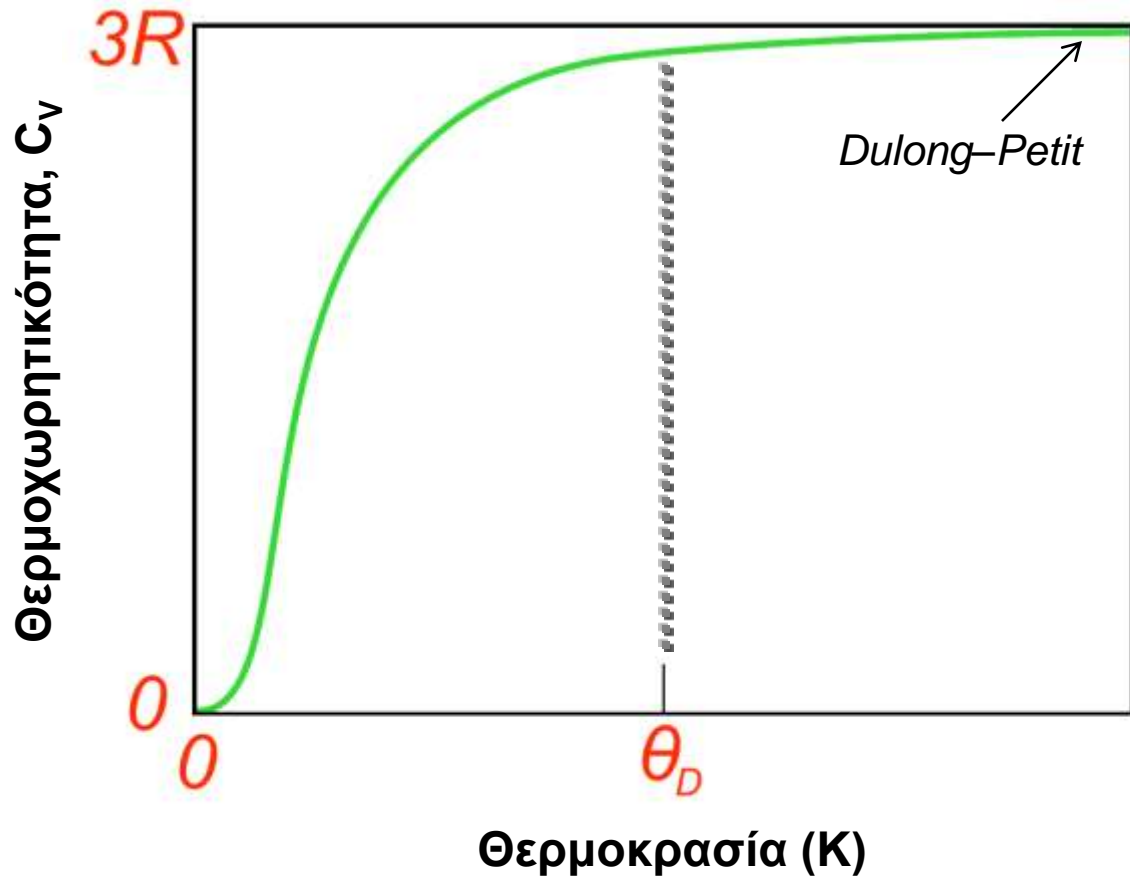
© User: Shaind / Wikipedia / Public Domain

Διαμήκη
«Ακουστικά»

Εγκάρσια
«Οπτικά»



Θερμοχωρητικότητα – εξάρτηση από θερμοκρασία



$$3R \approx 25 \text{ J}/(\text{mole K})$$

σε χαμηλή
θερμοκρασία

$$C_V = AT^3$$

Για $T > \theta_D$

$$C_V \approx 3R$$

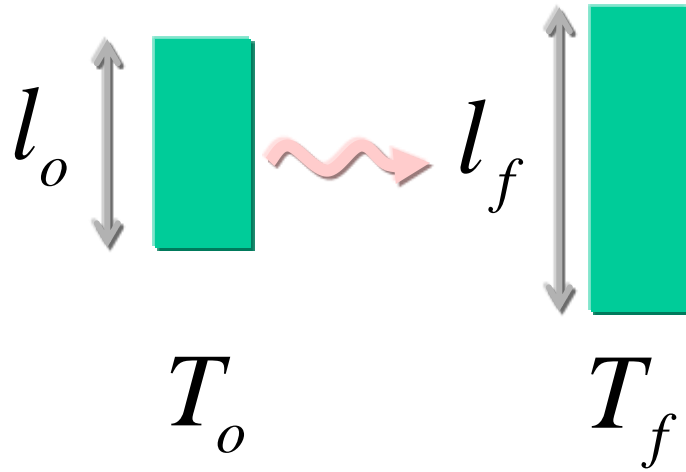
θ_D : θερμοκρασία Debye
συνήθως μικρότερη από θερμοκρασία δωματίου

Τυπικές Θερμοκρασίες Debye

Aluminium	428 K
Cadmium	209 K
Chromium	630 K
Copper	343.5 K
Gold	170 K
Iron	470 K
Lead	105 K
Manganese	410 K
Nickel	450 K
Platinum	240 K

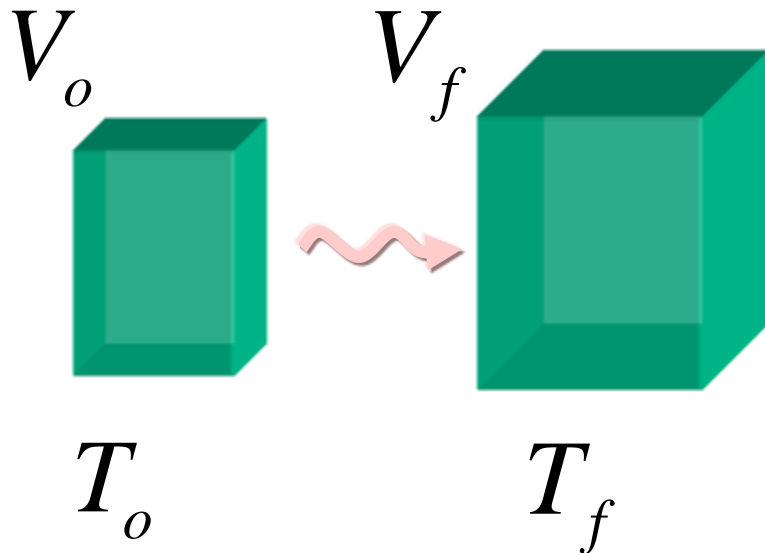
Silicon	645 K
Silver	215 K
Tantalum	240 K
Tin (white)	200 K
Titanium	420 K
Tungsten	400 K
Zinc	327 K
Carbon	2230 K
Ice	192 K

Θερμική διαστολή



$$\alpha_l \Delta T \equiv \frac{\Delta l}{l_o} = \varepsilon$$

Γραμμικός συντελεστής
θερμικής διαστολής
Μονάδες: $^{\circ}\text{C}^{-1}$



γενικά ανισότροπος

$$\alpha_V \Delta T \equiv \frac{\Delta V}{V_o}$$

Κατ' όγκο συντελεστής
θερμικής διαστολής
Μονάδες: $^{\circ}\text{C}^{-1}$

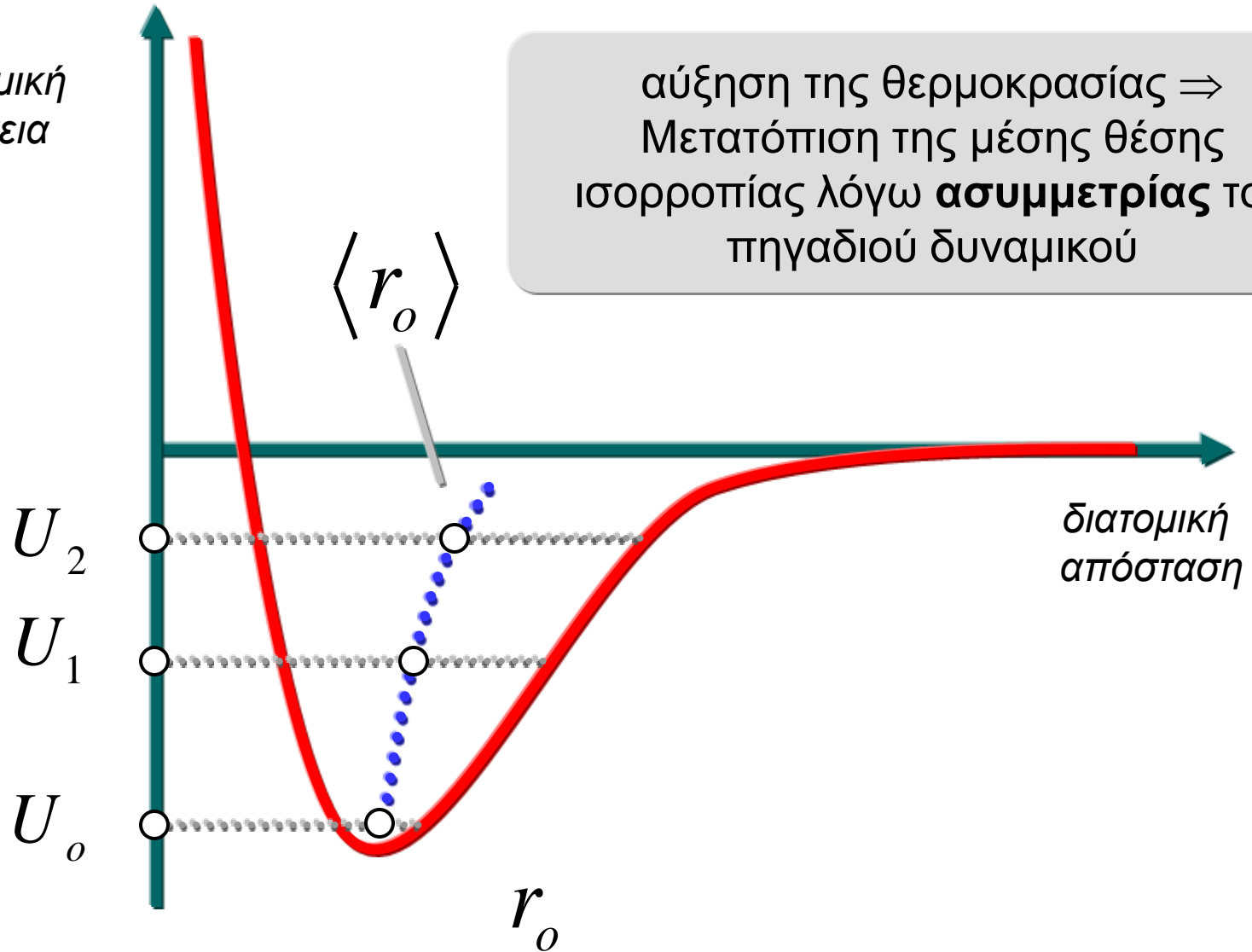
Ισότροπα υλικά

$$\alpha_V \approx 3\alpha_l$$

Θερμική διαστολή – ατομική κλίμακα

Δυναμική
ενέργεια

αύξηση της θερμοκρασίας \Rightarrow
Μετατόπιση της μέσης θέσης
ισορροπίας λόγω **ασυμμετρίας** του
πηγαδιού δυναμικού



Θερμικές ιδιότητες

Ισχυροί δεσμοί \Rightarrow μικρή διαστολή με την θερμοκρασία

Τυπικές τιμές συντελεστών θερμικής διαστολής

Κεραμικά

0.5 - 15 ($\times 10^{-6}$)

Μέταλλα*

5 - 25 ($\times 10^{-6}$)

Πολυμερή

50 - 400 ($\times 10^{-6}$)

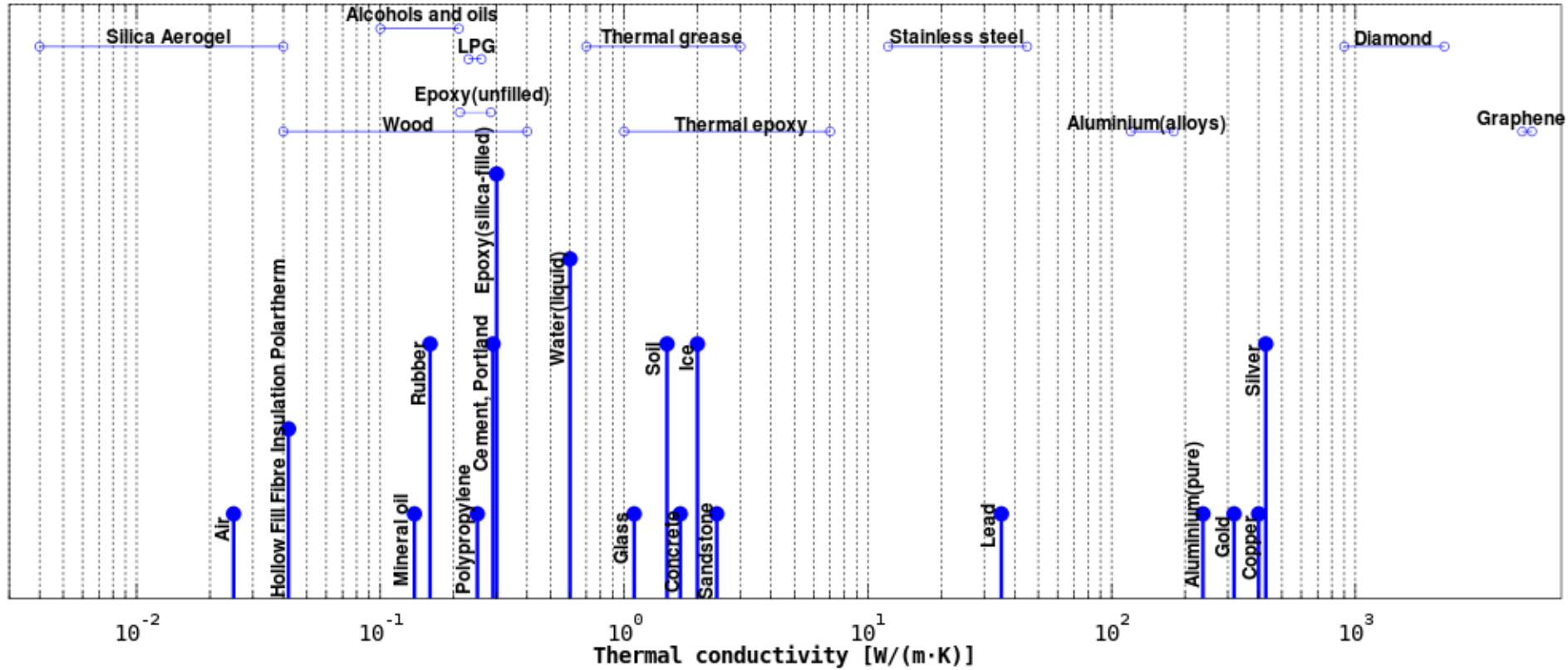
α_l ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Κρυσταλλικά : α_l ανισότροπο, άμορφα: α_l ισότροπο

*

κράμα KOVAR Fe-Ni-Co: $\alpha_l = 1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

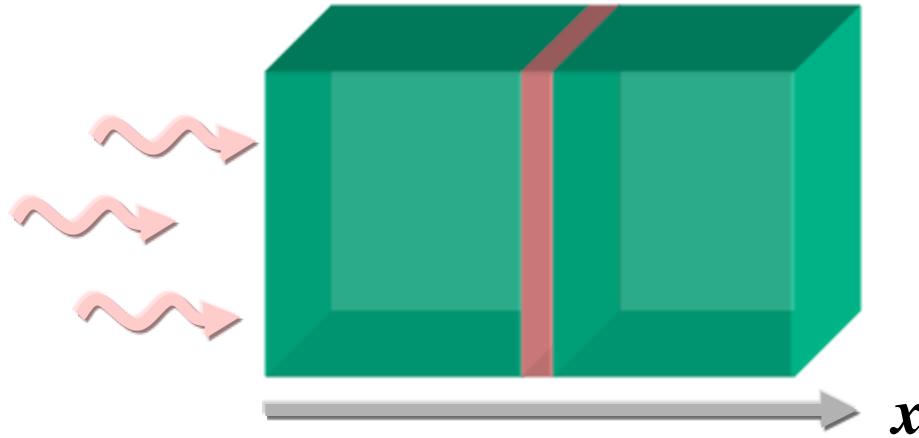
Experimental values of thermal conductivity



Τυπικές πειραματικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας

Grzegorz Knor/ Wikimedia Commons / Public Domain

Θερμική αγωγιμότητα



Ροή θερμότητας
ανά μονάδα
χρόνου και
επιφάνειας

Μονάδες:

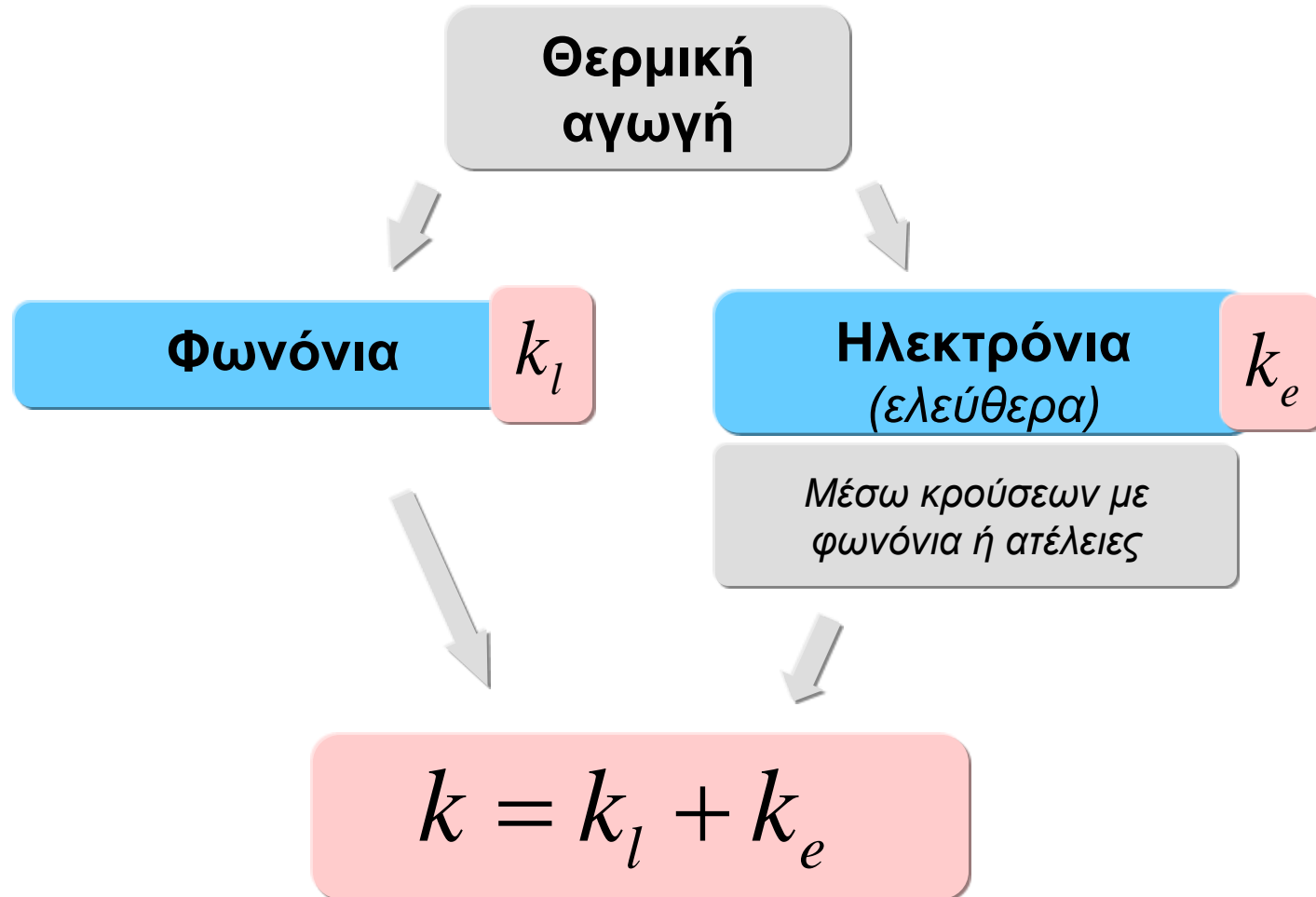
$$\frac{W}{m^2} \quad \text{ή} \quad \frac{Btu}{ft^2 \cdot h}$$

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

Θερμική αγωγιμότητα

Μονάδες: $\frac{W}{m \cdot K}$

Μηχανισμοί θερμικής αγωγής



Συνήθως ένας μηχανισμός υπερισχύει

Μέταλλα

$$k_e \gg k_l$$

$$k : 20 - 400 \frac{W}{m \cdot K}$$

Στα μέταλλα ο ηλεκτρονιακός μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι πιο αποδοτικός από την φωνονική συνεισφορά

Στα μέταλλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι υπεύθυνα και για ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Νόμος Wiedemann-Franz

σταθερά

$$2.44 \cdot 10^{-8} \frac{\Omega m \cdot W}{K^2}$$

$$L = \frac{k}{\sigma \cdot T}$$

Θερμική αγωγιμότητα $\frac{W}{m \cdot K}$

Ηλεκτρική αγωγιμότητα $1/\Omega m \cdot m$

Θερμοκρασία K

Μέταλλα – θερμικές ιδιότητες

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα $W/(m \cdot K)$	Ειδική θερμότητα $J/(Kg \cdot K)$	Συντελεστής θερμικής διαστολής $\times 10^{-6} (^{\circ}C)^{-1}$
Aluminium	247	900	23.6
Copper	398	386	17
Gold	315	128	14.2
Iron	80	448	11.8
Silver	428	235	19.7
Kovar (54Fe -29 Ni-17Co)	17	460	5.1

Πηγή: *Wikipedia*

Κράματα: Η παρουσία προσμίξεων οδηγεί σε μείωση της θερμικής αγωγιμότητας εξαιτίας της δράσης των προσμίξεων ως κέντρων σκέδασης

Κεραμικά

$$k_l \gg k_e$$

$$k : 2 - 50 \frac{W}{m \cdot K}$$

Στα κεραμικά υλικά τα φωνόνια είναι κατά κύριο λόγο υπεύθυνα για την θερμική αγωγιμότητα.

Τα φωνόνια δεν είναι τόσο **αποδοτικά** στην μεταφορά θερμότητας όσο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επειδή **σκεδάζονται** έντονα από τις **ατέλειες** του πλέγματος

Θερμικές ιδιότητες

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα $W/(m \cdot K)$	Ειδική θερμότητα $J/(Kg \cdot K)$	Συντελεστής θερμικής διαστολής $\times 10^{-6} (^\circ C)^{-1}$
Fused Silica (SiO_2)	1.4	850	0.4
Soda-lime glass	1.7	840	9.0
Borosilicate glass (<i>Pyrex</i>)	1.4	850	3.3
Alumina (Al_2O_3)	39	775	7.6

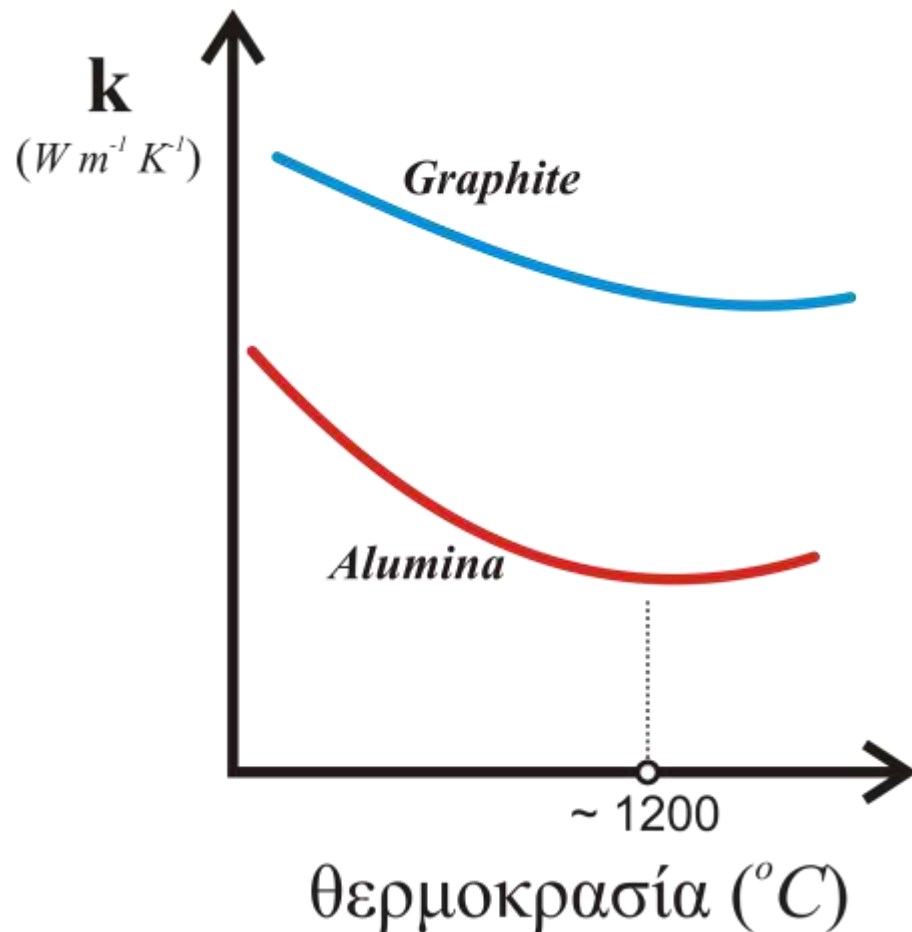
Πηγή: *Wikipedia*

Υλικά I, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, Διδάσκων: Δημήτρης Παπάζογλου

Κεραμικά

σε χαμηλές θερμοκρασίες η θερμική αγωγιμότητα κατά κανόνα **μειώνεται** με την αύξηση της θερμοκρασίας

σε υψηλές θερμοκρασίες η θερμική αγωγιμότητα **αυξάνεται** λόγω της μεταφοράς θερμότητας με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία



Τα άμορφα κεραμικά είναι λιγότερο αγωγίμα από κρυσταλλικά

Το πορώδες **ελαττώνει** τη θερμική αγωγιμότητα
(θερμική αγωγιμότητα αέρα $0.02 W/m \cdot K$)

Πολυμερή

$$k \approx 0.3 \frac{W}{m \cdot K}$$

Στα πολυμερή η θερμική αγωγιμότητα επιτυγχάνεται με την δόνηση και περιστροφή των μοριακών αλυσίδων. Η αύξηση του βαθμού κρυσταλλικότητας ενός πολυμερούς οδηγεί στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας!

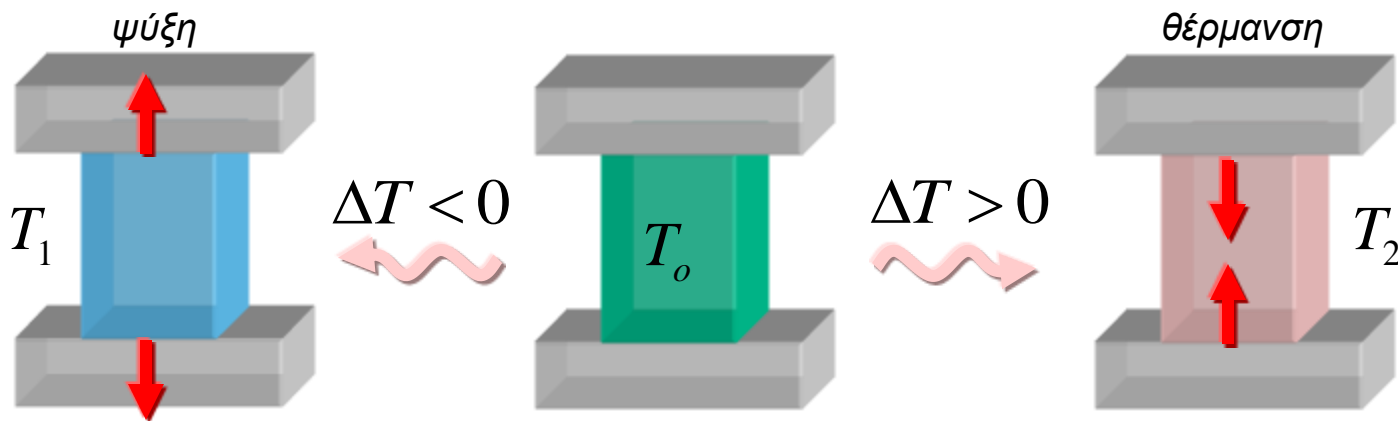
Θερμικές ιδιότητες

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα $W/(m \cdot K)$	Ειδική θερμότητα $J/(Kg \cdot K)$	Συντελεστής θερμικής διαστολής $\times 10^{-6} (^\circ C)^{-1}$
PE (<i>Polyethylene</i>)	0.5	1850	~150
Teflon/PTFE (<i>Polytetrafluoroethylene</i>)	0.25	1050	~190
PP (<i>Polypropylene</i>)	0.12	1925	~160

Πηγή: *Wikipedia*

Θερμική τάση

Όταν ένα υλικό θερμαίνεται ή ψύχεται ενώ βρίσκεται σε περιορισμό αναπτύσσονται θερμικές τάσεις



«Θερμική»
τάση

$$\sigma = -E \cdot a_l \cdot \Delta T$$

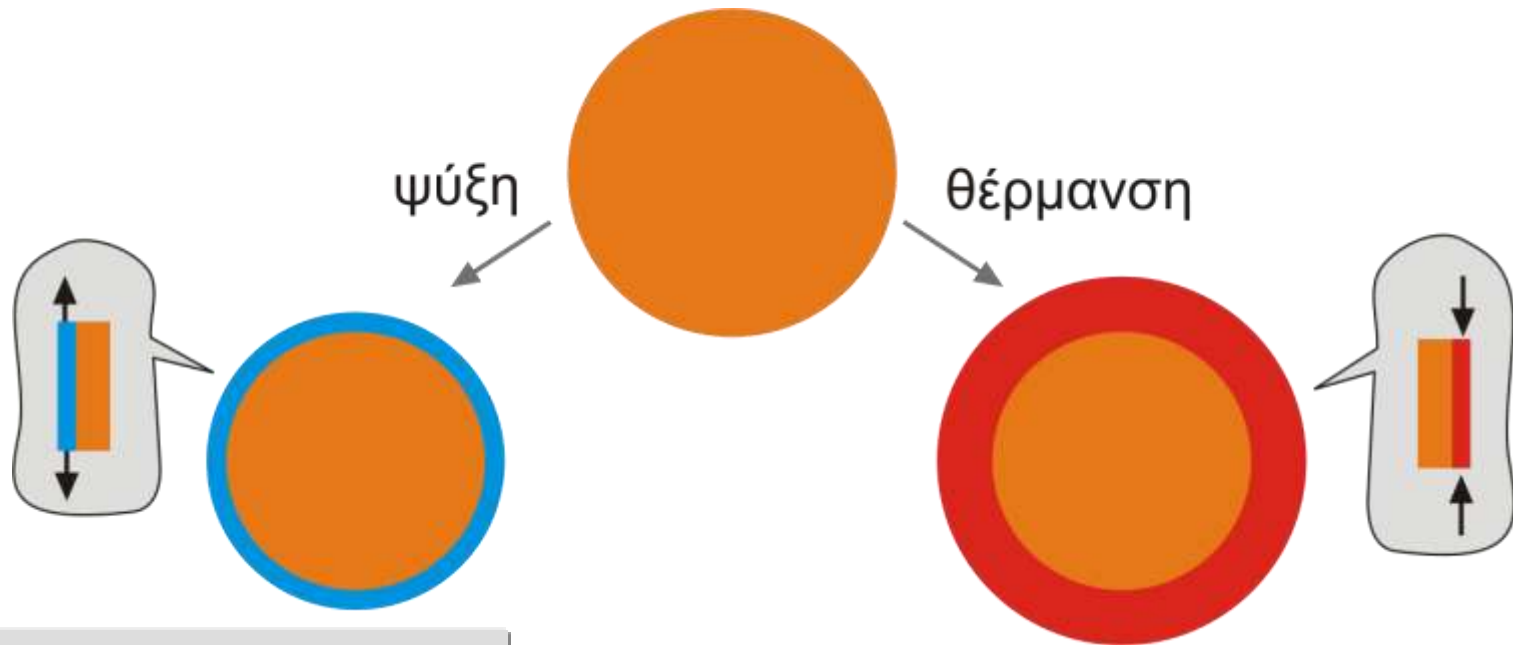
Μεταβολή
θερμοκρασίας

Μέτρο
ελαστικότητας

Συντελεστής
γραμμικής διαστολής

Αντοχή σε θερμικό σοκ

Θερμικό σοκ: απότομη ψύξη ή θέρμανση



Εφελκυστικές
θερμικές τάσεις

Θλιπτικές
θερμικές τάσεις

Οδηγούν σε θραύση μέσω του
σχηματισμού ρωγμών !

Όλκιμα υλικά

Οι τάσεις που αναπτύσσονται από το θερμικό σοκ οδηγούν σε πλαστική παραμόρφωση

Ψαθυρά υλικά

Οι τάσεις που αναπτύσσονται από το θερμικό σοκ οδηγούν σε θραύση !

***TSR*: αντίσταση στο θερμικό σοκ**

$$TSR = \frac{\sigma_f k}{E \alpha_l}$$

Βελτιώνεται με μεγάλη αντοχή στη θραύση,
Μικρό μέτρο ελαστικότητας,
Μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής,
Μεγάλη θερμική αγωγιμότητα

Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

