



# [119 ] Θερμοδυναμική Ι

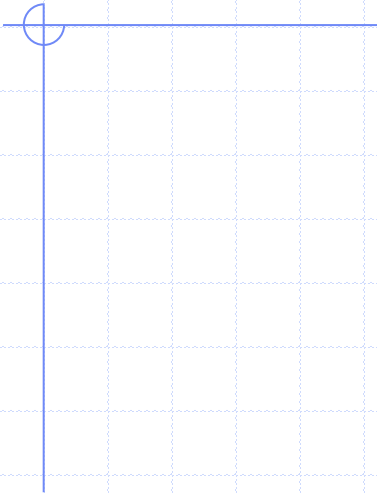
## Βασικές έννοιες & ορισμοί

*καθηγητής Γ. Σκόδρας*

# Contents...

- ✓ **Ορισμοί**
- ✓ **Βασικές έννοιες**
- ✓ **Συστήματα & όγκοι ελέγχου**
- ✓ **Διεργασίες & κύκλοι**



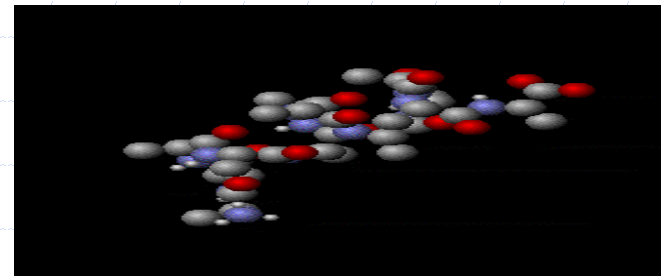
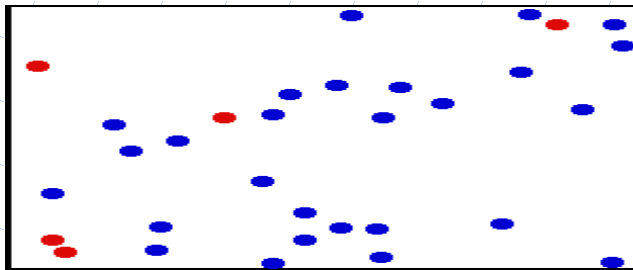


***Ορισμοί...***



# Ορισμοί...

- ❑ **Θερμοκρασία** είναι το φυσικό μέγεθος που μετρά την ενέργεια κίνησης ή ταλάντωσης της ύλης σε ατομικό επίπεδο
- ❑ Η ανταλλαγή της ενέργειας αυτής, όταν πιάνουμε κάτι με το χέρι για παράδειγμα, μας δίνει την αίσθηση του ζεστού και του κρύου, με την κατάσταση μεγαλύτερης ενέργειας να αντιστοιχεί στο «ζεστό» ή «θερμό», όταν συνολικά παίρνουμε ενέργεια, και της κατάστασης μικρότερης ενέργειας, κατά την οποία αντιλαμβανόμαστε να χάνουμε συνολικά ενέργεια, να αντιστοιχεί στο «κρύο»



# Ορισμοί...

- ❑ Η **θερμοκρασία** στη πράξη είναι ακριβώς το μέτρο εκείνο με το οποίο προσδιορίζεται η "**θερμική κατάσταση**" των διαφόρων σωμάτων, είναι δηλαδή ένα φυσικό **μέγεθος** που συνδέεται με την μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων ενός συστατικού, το οποίο και χαρακτηρίζει πόσο θερμό ή πόσο ψυχρό είναι αυτό
- ❑ Το αίτιο που δημιουργεί το αίσθημα του θερμού ή ψυχρού είναι η **θερμότητα** που όταν χορηγείται (απορροφάται) ή αφαιρείται (εκλύεται) από ένα σώμα προκαλεί "**μεταβολή θερμοκρασίας**" (ύψωση ή υποβίβασμό)
- ❑ Συνεπώς **θερμότητα** και **θερμοκρασία** είναι διαφορετικές έννοιες. Η θερμότητα είναι **μορφή ενέργειας**, η δε θερμοκρασία είναι **ιδιότητα και μέγεθος**



# Ορισμοί...

- ❑ Η **θερμοκρασία** μετριέται με ειδικά όργανα που λέγονται θερμόμετρα, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στο φαινόμενο της διαστολής ή συστολής ως αποτέλεσμα παροχής ή αφαίρεσης της θερμότητας
- ❑ Αλλά και η μεταβολή της θερμοκρασίας (ύψωση ή υποβιβασμός) είναι επίσης αποτέλεσμα της παροχής ή αφαίρεσης της θερμότητας. Έτσι με την παρατήρηση της διαστολής ή συστολής του υδραργύρου, που χρησιμοποιείται συνήθως στα θερμόμετρα, διαπιστώνεται και η μεταβολή της θερμοκρασίας η οποία αναγνώσκεται στη κατάλληλα βαθμολογημένη σε βαθμούς θερμοκρασίας κλίμακα του θερμομέτρου



# Ορισμοί...

- ❑ Γενικώς τα θερμόμετρα διακρίνονται σε "κοινά" ή "υδραργυρικά" και σε "θερμόμετρα οινοπνεύματος" (για χαμηλότερες θερμοκρασίες)
- ❑ Χρησιμοποιούνται επίσης και "ηλεκτρικά θερμόμετρα" που βασίζονται στην αρχή του θερμοηλεκτρικού στοιχείου, επίσης τα "οπτικά" ή ηλεκτρικά "πυρόμετρα" καθώς και άλλα ειδικών κατηγοριών



# Ορισμοί...

## Σχετική θερμοκρασία

- ❑ Κάθε θερμοκρασία που μετριέται αρχίζοντας από το 0° της κλίμακας Κελσίου ή της κλίμακας Φαρενάιτ ονομάζεται **σχετική θερμοκρασία** και καλείται θετική όταν είναι υψηλότερα του μηδενός και αρνητική όταν είναι χαμηλότερα
- ❑ Η σχετική θερμοκρασία έχει ευρύτατη χρήση τόσο στη καθημερινή ζωή του ανθρώπου όσο και στις διάφορες τεχνικές και μηχανολογικές εφαρμογές
- ❑ Συμβολίζεται με το λατινικό γράμμα ***t***





# Ορισμοί...

## Απόλυτη θερμοκρασία

- ❑ Κάθε θερμοκρασία που έχει ως αρχή μέτρησης το **απόλυτο μηδέν** της όποιας κλίμακας (Κελσίου ή Φαρενάιτ) χαρακτηρίζεται **απόλυτη θερμοκρασία**
- ❑ Το απόλυτο μηδέν είναι η θερμοκρασία από την οποία ξεκινά η **κλίμακα Kelvin** και που προσδιορίζεται για μεν την κλίμακα Κελσίου στους  **$-273,15^{\circ}\text{C}$** , για δε την κλίμακα Φαρενάιτ στους  **$-459,67^{\circ}\text{F}$**
- ❑ Θεωρητικά είναι η κατάσταση εκείνη στην οποία ένα υλικό δεν έχει καμία άλλη ενέργεια παρά αυτή από τις κβαντομηχανικές ταλαντώσεις των ατόμων που το αποτελούν (ενέργεια μηδενικού σημείου)
- ❑ Η απόλυτη θερμοκρασία συμβολίζεται με το γράμμα ***T***



# Ορισμοί...

## Θερμοδυναμικός ορισμός της θερμοκρασίας

- Με τον όρο **θερμοκρασία** χαρακτηρίζεται, ποσοτικά, η τάξη μεγέθους των διακυμάνσεων της ενέργειας που συνδέονται με ένα άτομο, μόριο ή κάποιο άλλο στοιχειώδες συστατικό ενός φυσικού συστήματος που είναι  $k_B T$ , όπου  $k_B$  είναι η **σταθερά του Boltzman** και  $T$  η θερμοκρασία εκπεφρασμένη σε βαθμούς Kelvin
- Οι τυπικές ιδιότητες της θερμοκρασίας μελετώνται στην **θερμοδυναμική** και στην **στατιστική μηχανική**. Η θερμοκρασία ενός συστήματος σε θερμοδυναμική ισορροπία ορίζεται από την σχέση μεταξύ της θερμότητας  $\delta Q$  που προσφέρεται σε ένα σύστημα στην διάρκεια μιας απειροστά μικρής **αντιστρεπτής μεταβολής** και την μεταβολή  $dS$  της **εντροπίας** του κατά την μεταβολή

$$dS = \delta Q/T$$



# Ορισμοί...

- ❑ Σε αντίθεση με την εντροπία και την θερμότητα των οποίων οι μικροσκοπικοί ορισμοί ισχύουν ακόμα και μακριά από την θερμοδυναμική ισορροπία, η θερμοκρασία μπορεί να οριστεί μόνο σε θερμοδυναμική ισορροπία ή τοπική θερμοδυναμική ισορροπία
- ❑ Καθώς ένα σύστημα προσλαμβάνει θερμότητα η θερμοκρασία του ανεβαίνει και ομοίως η απώλεια θερμότητας προκαλεί πτώση της θερμοκρασίας
- ❑ Όταν δυο συστήματα βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, δεν παρατηρείται ροή θερμότητας μεταξύ τους



# Ορισμοί...

- ❑ Όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας, θερμότητα θα τείνει να κινηθεί από το υψηλότερης θερμοκρασίας σύστημα στο χαμηλότερης μέχρι την αποκατάσταση **θερμικής ισορροπίας**. Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να γίνει με επαφή, μεταφορά (ύλης) ή ακτινοβολία.
- ❑ Η θερμοκρασία είναι **εντατική παράμετρος** ενός συστήματος, δηλαδή δεν εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος
- ❑ Άλλες εντατικές παράμετροι είναι η πίεση και η πυκνότητα. Σε αντίθεση η μάζα, ο όγκος και η εντροπία είναι **εκτατικές παράμετροι** και εξαρτώνται από το μέγεθος του συστήματος (συνήθως είναι ανάλογες με το μέγεθός του).



# Ορισμοί...

- ❑ Όλες οι κλίμακες θερμοκρασίας βασίζονται σε καταστάσεις που μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν, όπως η πήξη κι ο βρασμός του νερού
- ❑ **Σημείο πάγου:** Είναι ένα μείγμα νερού και πάγου σε ισορροπία με αέρα κορεσμένο σε ατμό, υπό πίεση 1atm (0°C ή 32°F)
- ❑ **Σημείο ατμού:** Είναι ένα μείγμα υγρού νερού και υδρατμού (χωρίς αέρα) σε ισορροπία, υπό πίεση 1atm (100°C ή 212°F)
- ❑ **Κλίμακα Κελσίου:** χρησιμοποιείται στο μετρικό σύστημα
- ❑ **Κλίμακα Φαρενάιτ:** χρησιμοποιείται στο αγγλοσαξονικό σύστημα
- ❑ **Θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασίας:** Είναι μια κλίμακα θερμοκρασιών, ανεξάρτητη από τις ιδιότητες της οποιασδήποτε ουσίας
- ❑ **Kelvin scale** (μετρικό σύστημα)
- ❑ **Rankine scale** (α/σαξονικό σύστημα)
- ❑ Μια θερμοκρασιακή κλίμακα σχεδόν ταυτόσημη προς την κλίμακα Kelvin είναι η **κλίμακα θερμοκρασίας ιδανικού αερίου**. Οι θερμοκρασίες σε αυτήν την κλίμακα μετρώνται με ένα **θερμόμετρο αερίου σταθερού όγκου**.

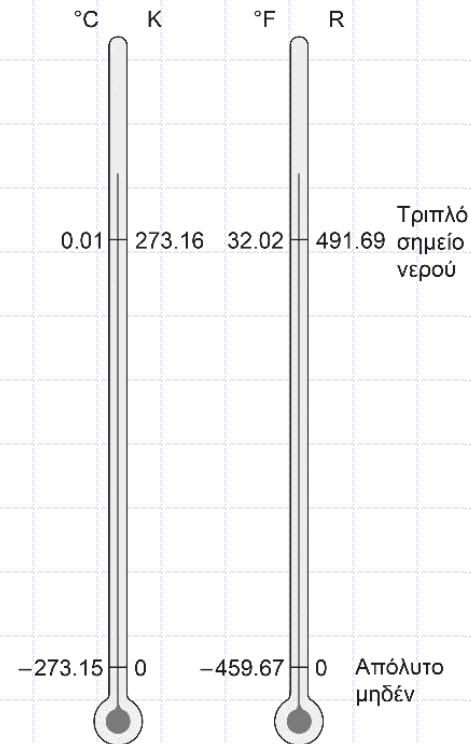
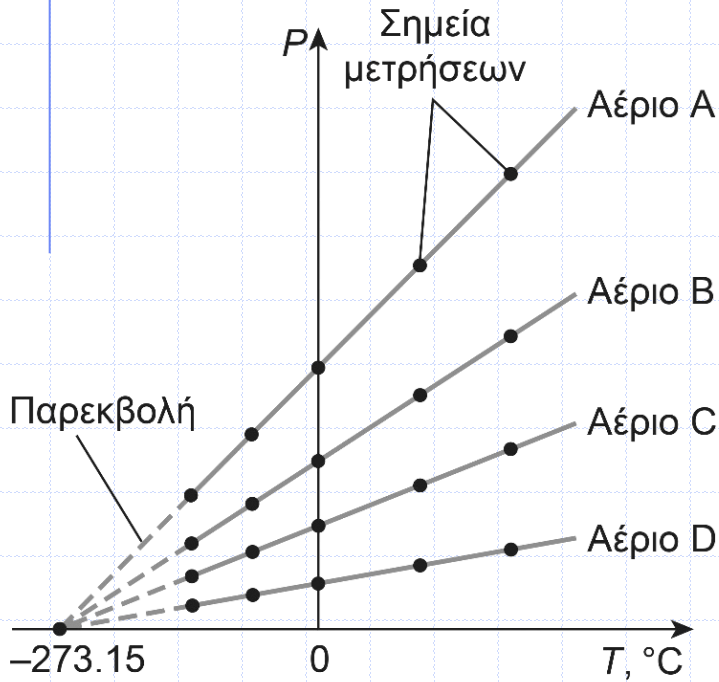
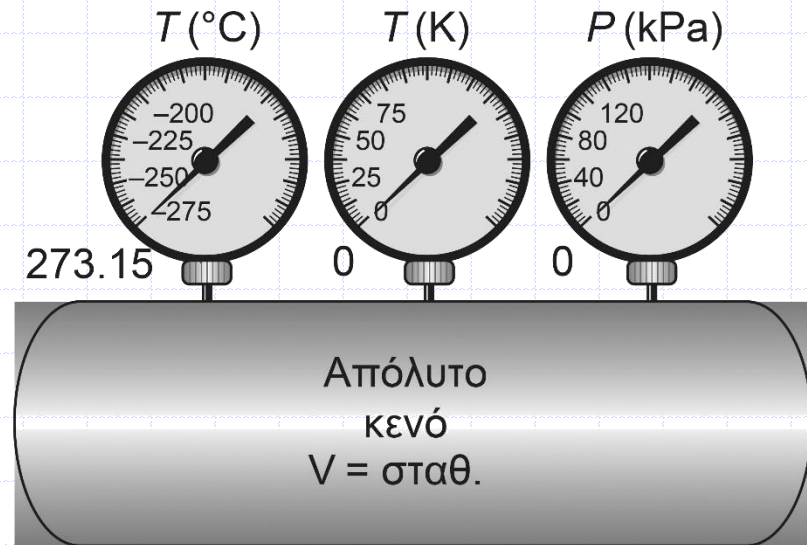


# Ορισμοί...

- ❑ Όλες οι κλίμακες θερμοκρασίας βασίζονται σε καταστάσεις που μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν, όπως η πήξη κι ο βρασμός του νερού
- ❑ **Σημείο πάγου:** Είναι ένα μείγμα νερού και πάγου σε ισορροπία με αέρα κορεσμένο σε ατμό, υπό πίεση 1atm (0°C ή 32°F)
- ❑ **Σημείο ατμού:** Είναι ένα μείγμα υγρού νερού και υδρατμού (χωρίς αέρα) σε ισορροπία, υπό πίεση 1atm (100°C ή 212°F)
- ❑ **Κλίμακα Κελσίου:** χρησιμοποιείται στο μετρικό σύστημα
- ❑ **Κλίμακα Φαρενάιτ:** χρησιμοποιείται στο αγγλοσαξονικό σύστημα
- ❑ **Θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασίας:** Είναι μια κλίμακα θερμοκρασιών, ανεξάρτητη από τις ιδιότητες της οποιασδήποτε ουσίας
- ❑ **Kelvin scale** (μετρικό σύστημα)
- ❑ **Rankine scale** (α/σαξονικό σύστημα)
- ❑ Μια θερμοκρασιακή κλίμακα σχεδόν ταυτόσημη προς την κλίμακα Kelvin είναι η **κλίμακα θερμοκρασίας ιδανικού αερίου**. Οι θερμοκρασίες σε αυτήν την κλίμακα μετρώνται με ένα **θερμόμετρο αερίου σταθερού όγκου**.



# Ορισμοί...



# Ορισμοί...

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

$$T(\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459.67$$

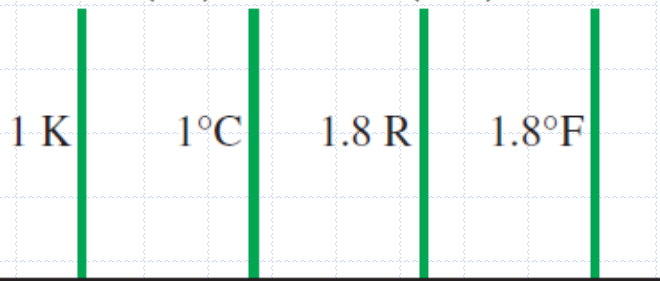
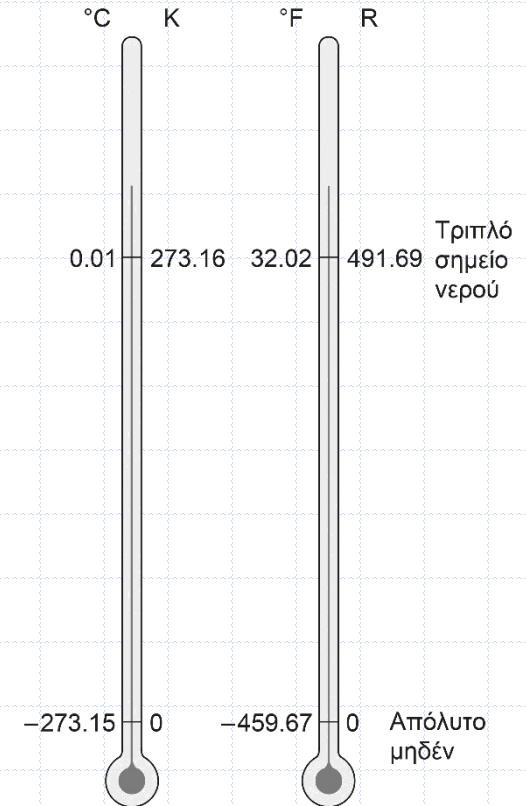
$$T(\text{R}) = 1.8T(\text{K})$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1.8T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C})$$

$$\Delta T(\text{R}) = \Delta T(^{\circ}\text{F})$$

Σύγκριση των  
κλιμάκων  
θερμοκρασίας



Σύγκριση των  
μέτρων των  
μεταβολών  
θερμοκρασίας

- ✓ Το σημείο αναφοράς στην κλίμακα Κέλβιν ήταν αρχικά το **σημείο πάγου**, 273,15K, δηλαδή το σημείο όπου παγώνει το νερό (ή, λιώνει ο πάγος)
- ✓ Το σημείο αναφορά άλλαξε σε ένα ακριβέστερα αναπαραστήσιμο σημείο, το **τριπλό σημείο ύδατος** (εκεί όπου συνυπάρχουν οι τρεις φάσεις του νερού –στερεά, υγρή, ατμός– σε ισορροπία), στο οποίο αντιστοιχεί η τιμή 273,16K





# Ορισμοί...

- ❑ Η *Διεθνής Θερμοκρασιακή Κλίμακα του 1990* διαδέχθηκε τις Διεθνείς Θερμοκρασιακές Κλίμακες του 1968 (**IPTS-68**), 1948 (**ITPS-48**) και του 1927 (**ITS-27**)
- ❑ Η ITS-90 είναι όμοια με τις προγενέστερες κλίμακες, εκτός του ότι είναι εμπλουτισμένη με ακριβέστερες τιμές, καλύπτει μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών και προσεγγίζει αρκετά καλύτερα τη θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασίας
- ❑ Στην Κλίμακα αυτή, η μονάδα της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας είναι και πάλι το Κέλβιν, που ορίζεται ως το  $1/273,16$  της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας του τριπλού σημείου ύδατος, που αποτελεί το κύριο σημείο βαθμονόμησης των θερμομέτρων σύμφωνα με την ITS-90. Η μονάδα στην κλίμακα Κελσίου είναι ο βαθμός Κελσίου ( $^{\circ}\text{C}$ )
- ❑ Το σημείο πάγου παραμένει στους  $0^{\circ}\text{C}$  ( $273.15\text{ K}$ ) και στις δύο κλίμακες (ITS-90 & IPTS-68), αλλά το σημείο ατμού είναι στους  $99.975^{\circ}\text{C}$  (ITS-90) αντί των  $100.000^{\circ}\text{C}$  (IPTS-68)
- ❑ Η μεταβολή αυτή οφείλεται σε ακριβείς μετρήσεις με θερμόμετρο αερίου, με ιδιαίτερη προσοχή στο φαινόμενο της ρόφησης, δηλαδή των προσμίξεων στη μάζα του αερίου, οι οποίες απορροφώντας από τα τοιχώματα του θερμομέτρου στη θερμοκρασία αναφοράς και αποβάλλονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, προκαλώντας αύξηση της πίεσης του αερίου



# Ορισμοί...

**Πίση:** Είναι η κάθετη δύναμη που ασκείται σε ένα ρευστό ανά μονάδα επιφάνειας

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

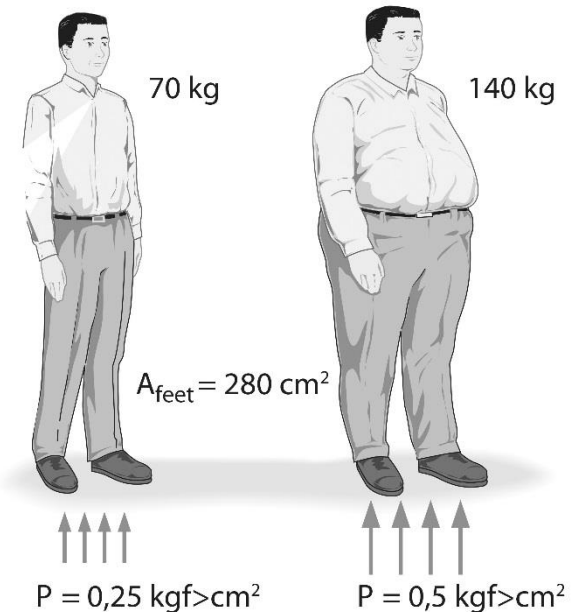
$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bars}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ kgf/cm}^2 &= 9.807 \text{ N/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa} \\ &= 0.9807 \text{ bar} \\ &= 0.9679 \text{ atm} \end{aligned}$$



Μερικά όργανα  
μέτρησης της πίεσης



$$P = s_n = \frac{W}{A_{\text{feet}}} = \frac{70 \text{ kgf}}{280 \text{ cm}^2} = 0,25 \text{ kgf/cm}^2$$

Η κάθετη τάση στα πόδια ενός  
ευτραφούς ατόμου είναι πολύ  
μεγαλύτερη από εκείνη στα πόδια  
ενός σχετικά αδύνατου

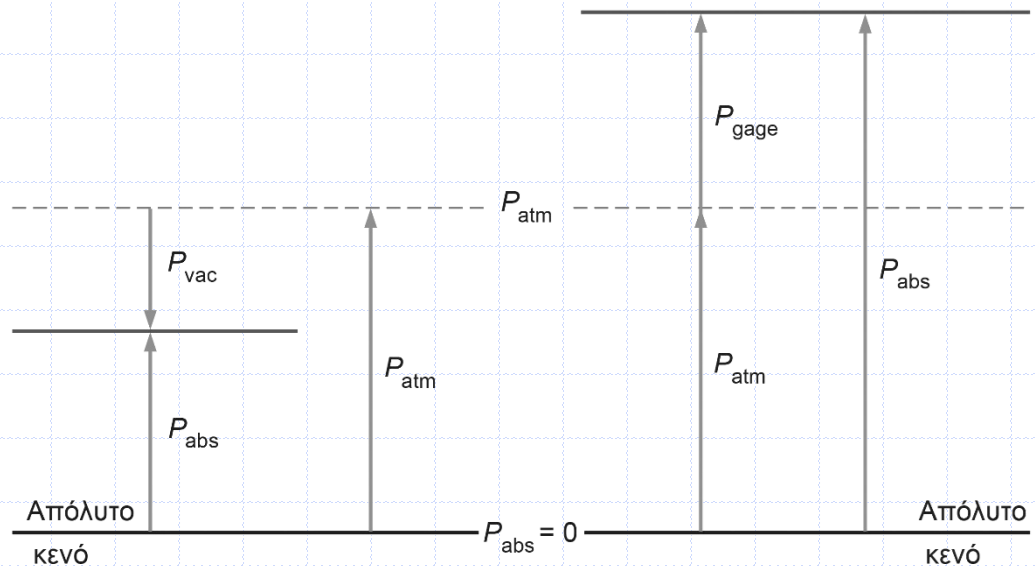
# Ορισμοί...

- ❑ **Απόλυτη πίεση:** είναι η πραγματική τιμή της πίεσης σε δεδομένο σημείο, και μετριέται σε σχέση με το απόλυτο κενό (δηλαδή, τη μηδενική απόλυτη πίεση)
- ❑ **Μανομετρική πίεση:** είναι η διαφορά μεταξύ της απόλυτης πίεσης και της τοπικής ατμοσφαιρικής πίεσης. Τα περισσότερα μετρητικά όργανα μετρούν τη μανομετρική πίεση
- ❑ **Υποπίεσεις:** είναι πιέσεις χαμηλότερες της ατμοσφαιρικής

Γενικά, ο όρος «πίεση»  $P$  αντιστοιχεί στην **απόλυτη πίεση** εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά

$$P_{\text{gage}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}}$$

$$P_{\text{vac}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{abs}}$$



# Ορισμοί...

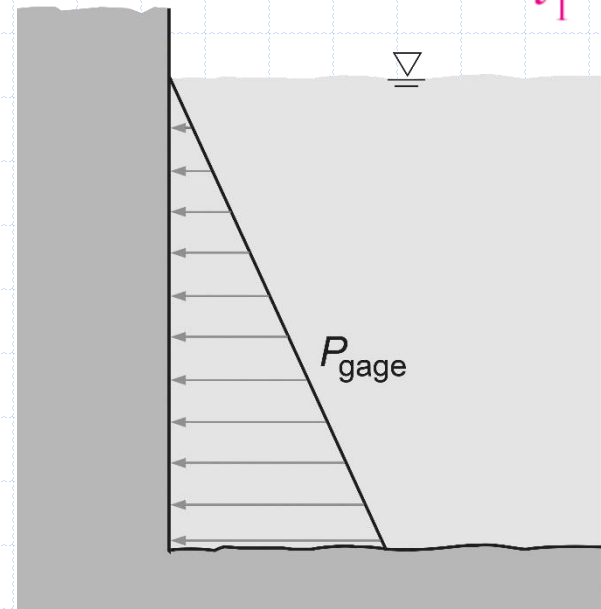
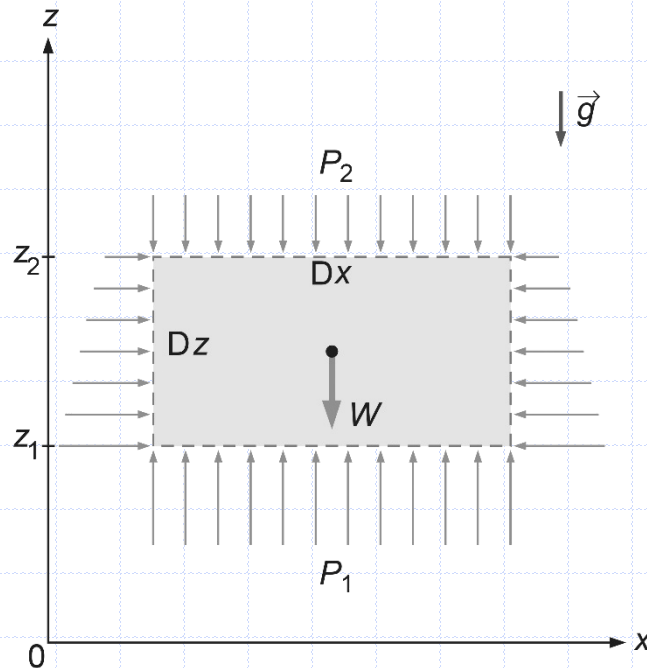
## Μεταβολή της πίεσης με το βάθος

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g \Delta z = \gamma_s \Delta z$$

$$P = P_{\text{atm}} + \rho g h \quad \text{or} \quad P_{\text{gage}} = \rho g h$$

Μεταβαλλόμενη πυκνότητα με το βάθος:

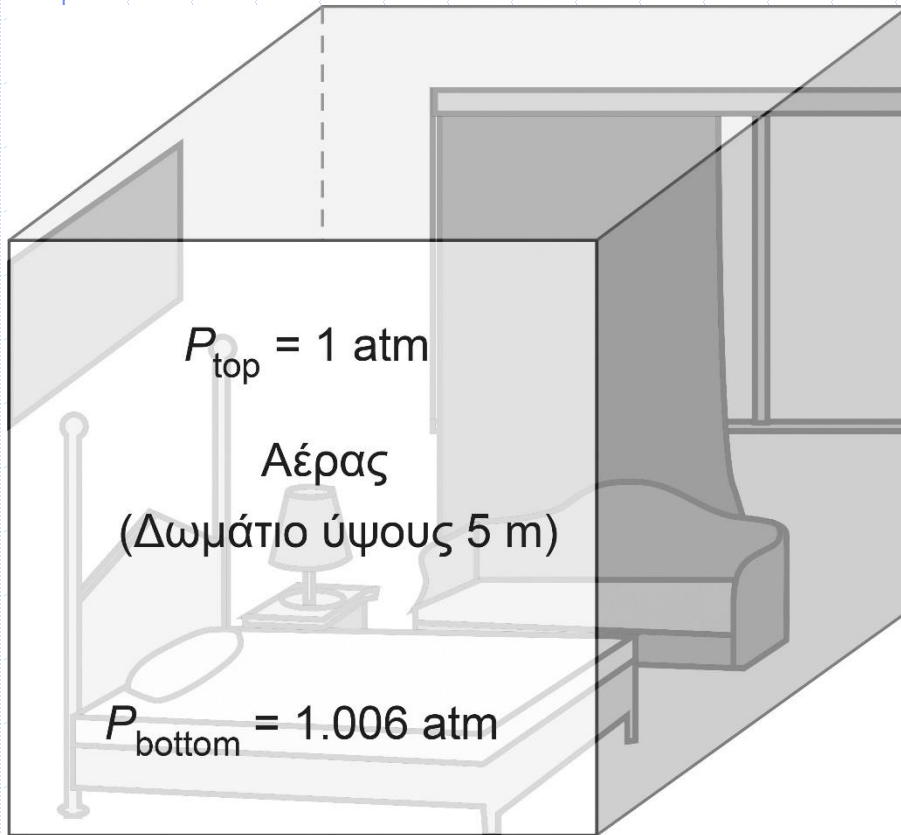
$$\Delta P = P_2 - P_1 = - \int_1^2 \rho g dz$$



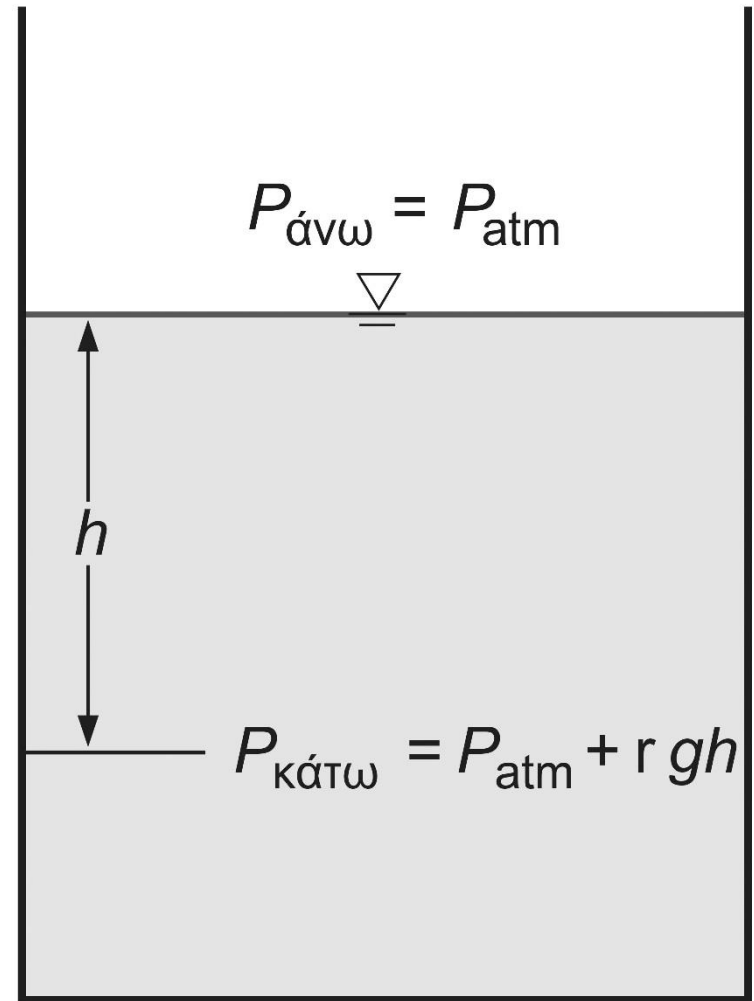
Διάγραμμα ελεύθερου σώματος ενός στοιχειώδους ορθογωνίου του ρευστού σε ισορροπία

Η πίεση ενός ρευστού σε ηρεμία αυξάνεται με το βάθος

# Ορισμοί...



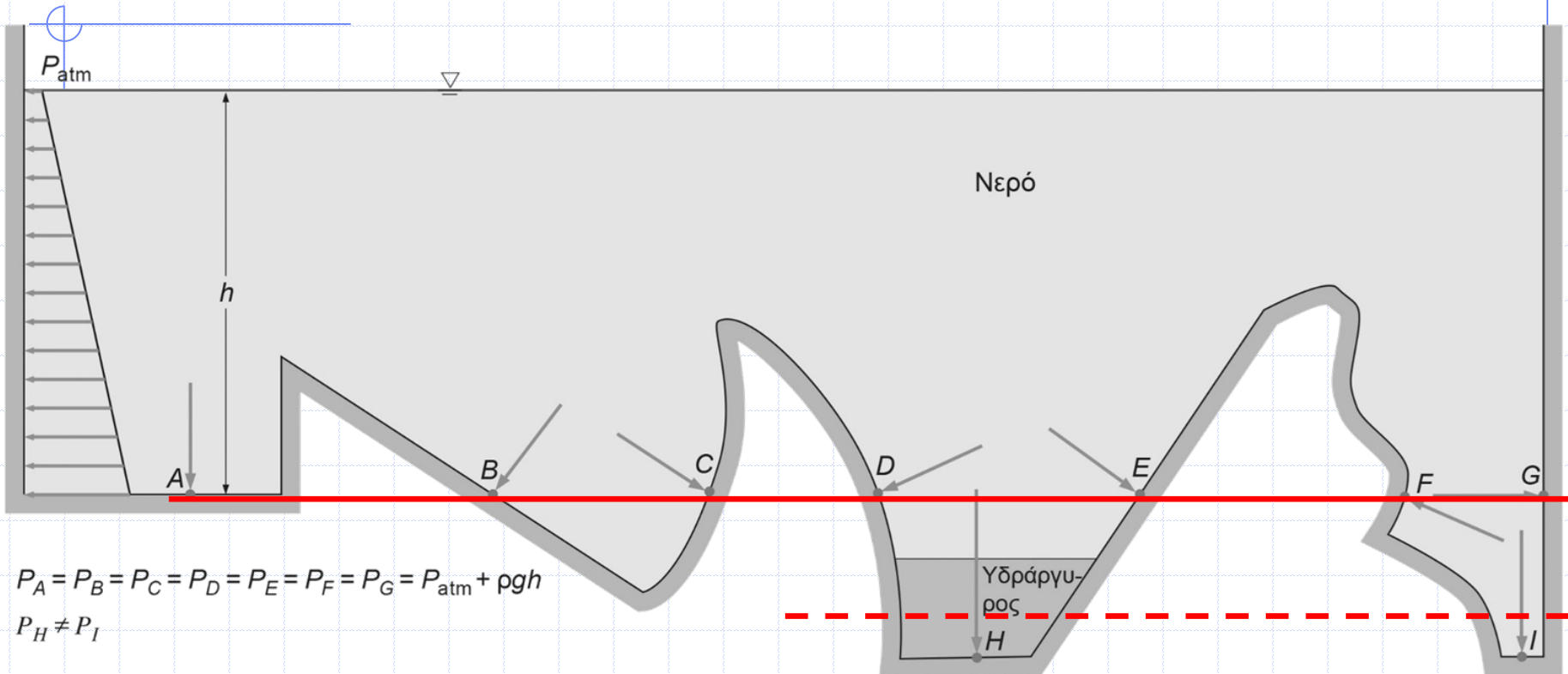
Μέσα σε ένα δωμάτιο, γεμάτο με αέρα, η καθ' ύψος μεταβολή της πίεσης είναι αμελητέα



Η πίεση σε ένα εν ηρεμία υγρό αυξάνεται γραμμικά με το ύψος από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού



# Ορισμοί...



**Η πίεση σε όλα τα σημεία ενός οριζοντίου επιπέδου μέσα σε ένα ρευστό, ανεξαρτήτως της γεωμετρίας, είναι ίδια, εφ' όσον πάνω από όλα τα σημεία είναι το ίδιο ρευστό**

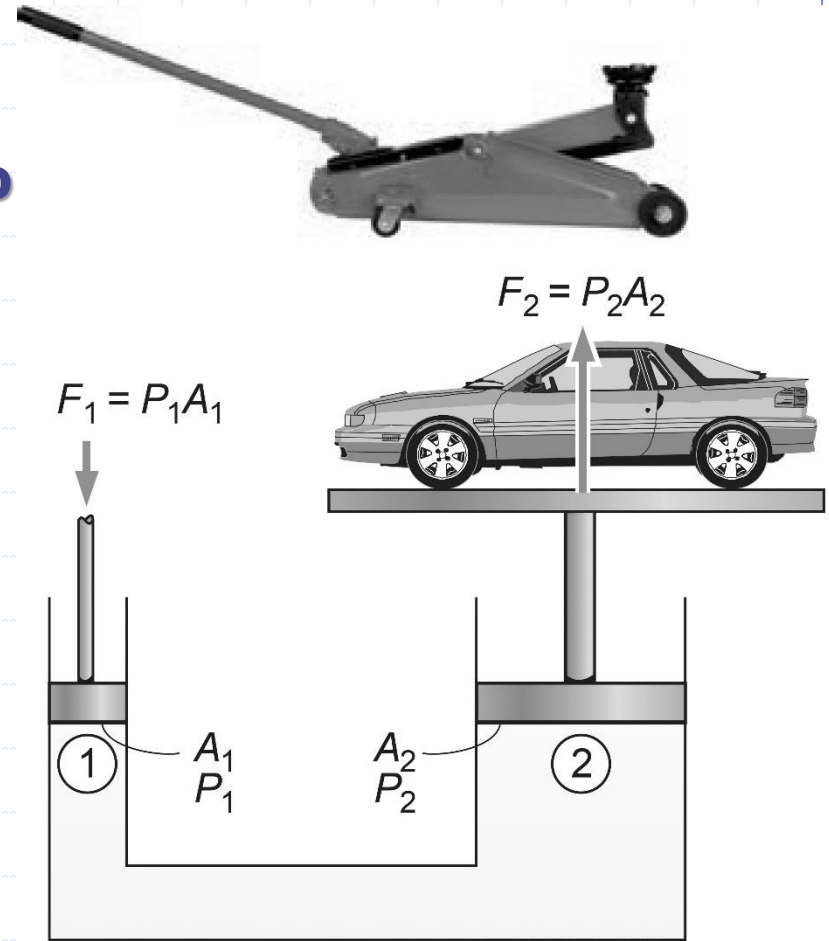


# Ορισμοί...

**Νόμος του Pascal:** πίεση που εφαρμόζεται σε ένα περικλειστο ρευστό, αυξάνει την πίεση σε όλο τον όγκο του ρευστού κατά την ίδια τιμή

$$P_1 = P_2 \rightarrow \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \rightarrow \frac{F_2}{F_1} = \frac{A_2}{A_1}$$

Ο λόγος επιφανειών  $A_2/A_1$  καλείται **ιδανικό μηχανικό πλεονέκτημα** του γρύλου

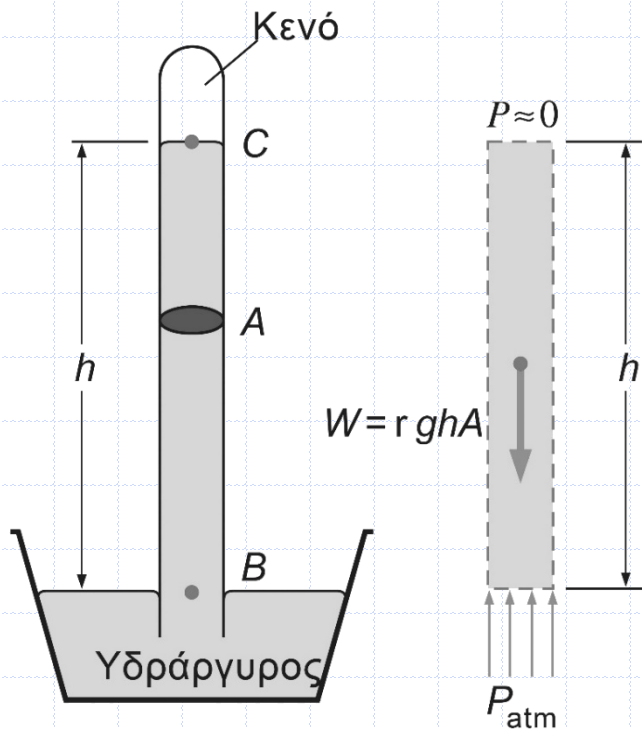


Ανύψωση ενός μεγάλου βάρους με άσκηση μιας μικρής δύναμης



# Ορισμοί...

## Όργανα μέτρησης της πίεσης



Αρχή λειτουργίας του βαρομέτρου

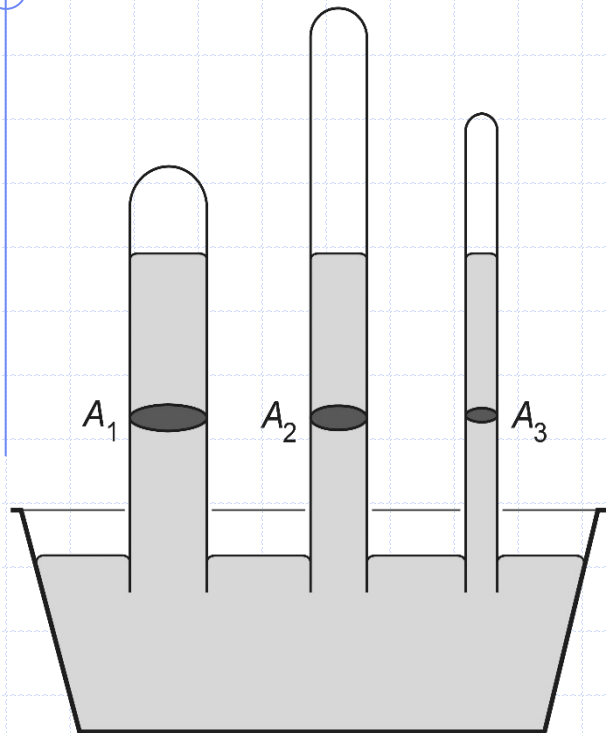
## Το βαρόμετρο

- ❑ Η ατμοσφαιρική πίεση μετριέται με το **βαρόμετρο**, συνεπώς η πίεση της ατμόσφαιρας συχνά αναφέρεται ως **βαρομετρική πίεση**
- ❑ Μια συνήθης μονάδα πίεσης είναι η **τυπική ατμόσφαιρα**, που ορίζεται ως η πίεση που ασκείται από μια στήλη υδραργύρου ύψους 760mm υπό θερμοκρασία 0°C ( $\rho_{\text{Hg}} = 13.595 \text{ kg/m}^3$ ) και υπό τυπική επιτάχυνση της βαρύτητας ( $g = 9.807 \text{ m/s}^2$ )

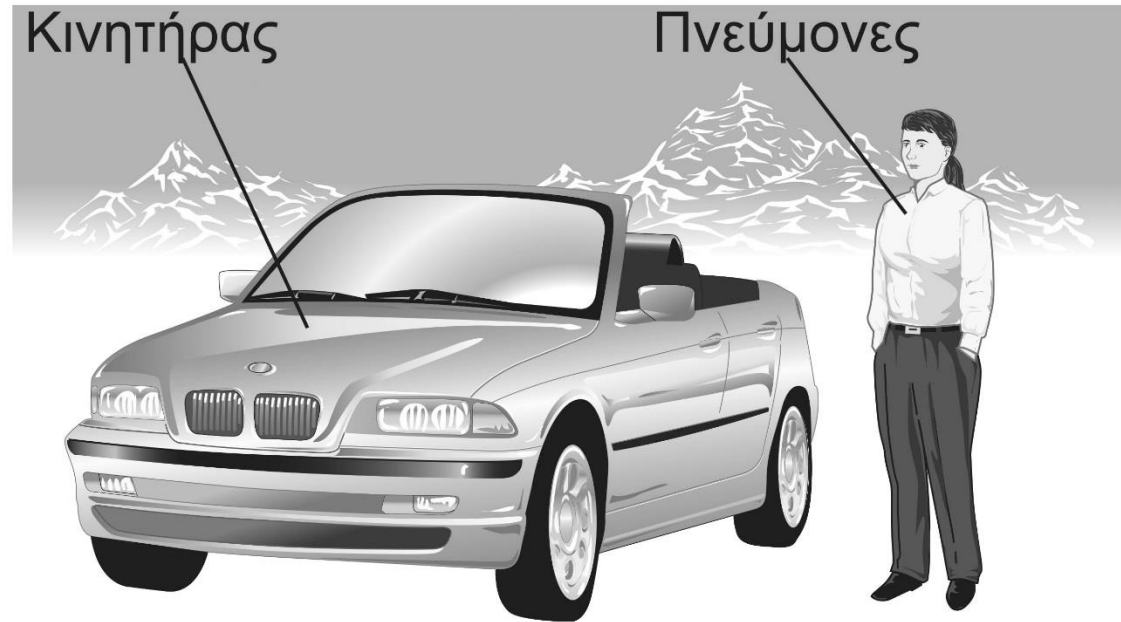
$$P_{\text{atm}} = \rho gh$$



# Ορισμοί...

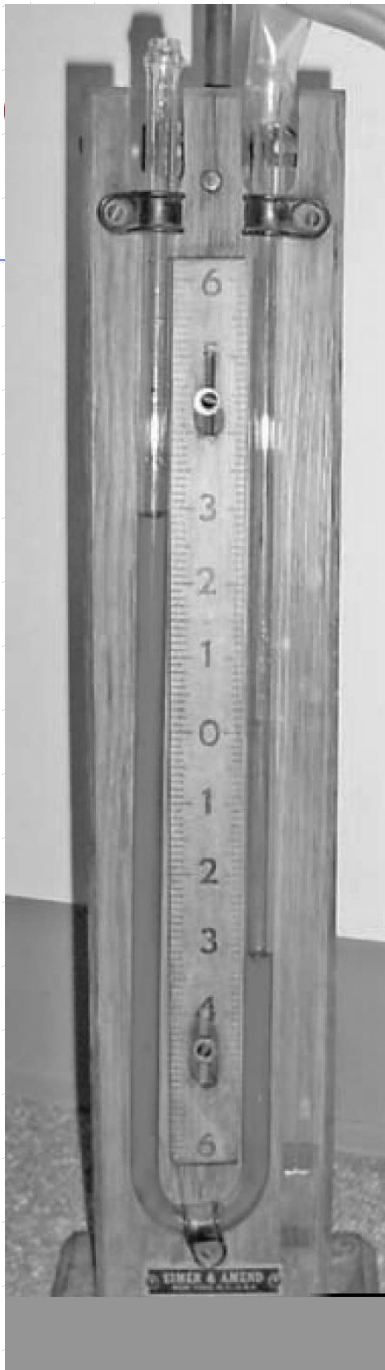


Το μήκος ή η διατομή ενός  
μανομετρικού σωλήνα δεν  
επηρεάζουν τη μέτρηση της  
πίεσης, αρκεί η διάμετρος του  
σωλήνα να είναι επαρκώς μεγάλη,  
ώστε να αποφεύγονται τριχοειδή  
φαινόμενα



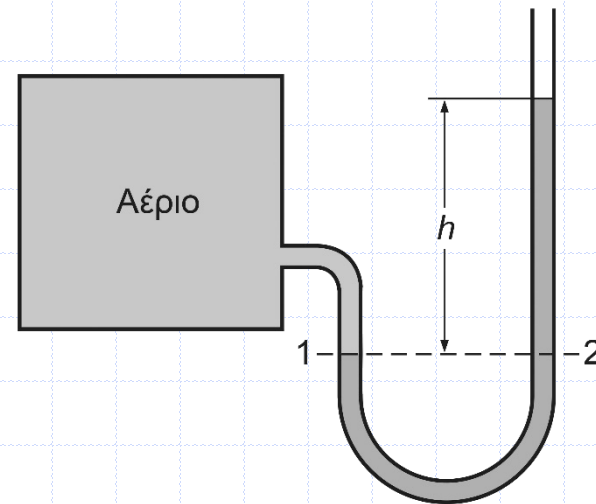
Σε μεγάλα υψόμετρα, μια μηχανή αποδίδει λιγότερη ισχύ κι  
ένας άνθρωπος καταναλώνει λιγότερο οξυγόνο, λόγω της  
χαμηλότερης πυκνότητας του αέρα





## Το μανόμετρο

Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μικρών και μεσαίων πιέσεων. Το μανόμετρο περιέχει ένα ή περισσότερα μανομετρικά υγρά, π.χ. υδράργυρο, νερό, αλκοόλη ή λάδι



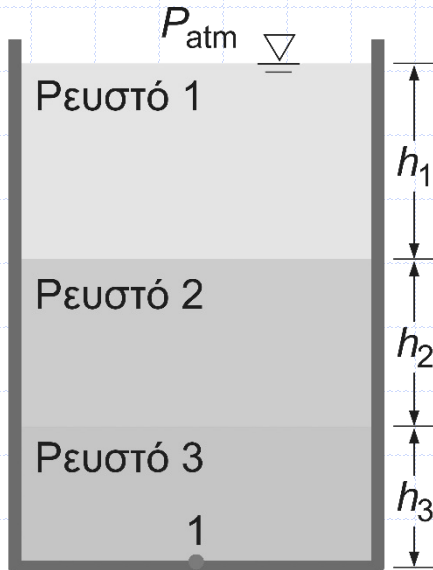
$$P_2 = P_{\text{atm}} + \rho gh$$

Αρχή λειτουργίας του μανομέτρου



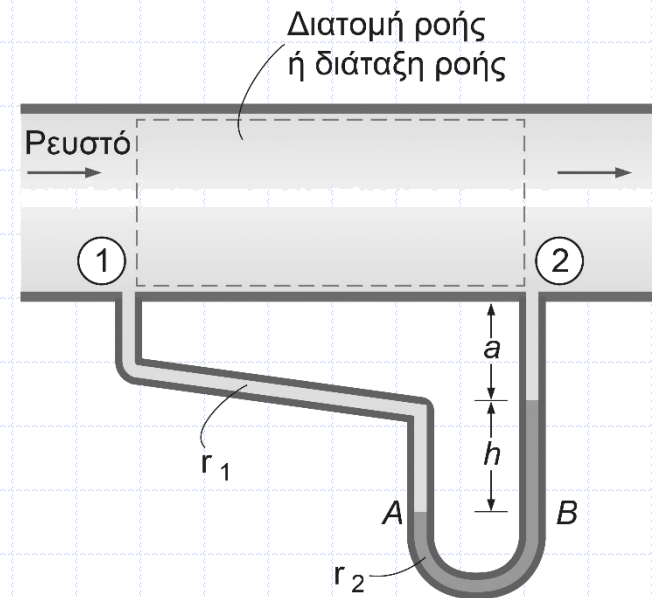
# Ορισμοί...

## Διαστρωμάτωση ρευστών



$$P_{\text{atm}} + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 + \rho_3 g h_3 = P_1$$

## Η μέτρηση της πτώσης πίεσης κατά μήκος μιας διατομής της ροής γίνεται με ένα διαφορικό μανόμετρο



$$P_1 + \rho_1 g (a + h) - \rho_2 g h - \rho_1 g a = P_2$$

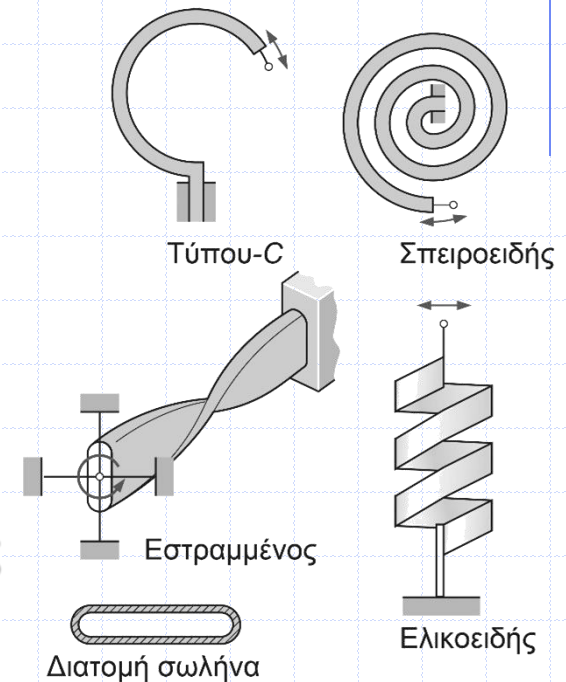
$$P_1 - P_2 = (\rho_2 - \rho_1) g h \quad 27$$



# Ορισμοί...

- ✓ **Σωλήνας Bourdon:** αποτελείται από έναν κοίλο μεταλλικό σωλήνα (σαν γάντζο), το ένα άκρο του οποίου είναι κλειστό και συνδεδεμένο με ένα καντράν
- ✓ **Μετατροπείς πίεσης:** εφαρμόζουν διάφορες τεχνικές για τη μετατροπή μιας πίεσης σε ένα ηλεκτρικό ερέθισμα (π.χ. μεταβολή τάσης, αντίστασης ή χωρητικότητας)
- ✓ Οι μετατροπείς πίεσης είναι μικροί και ταχείας αποκρίσεως, πιο ευαίσθητοι, πιο αξιόπιστοι και πιο ακριβείς σε σχέση με τους μηχανικούς μετρητές πίεσης
- ✓ **Διαστολικοί μετατροπείς μανομετρικής πίεσης:** λειτουργούν με την εκτροπή ενός διαφράγματος, ανοιχτού σε 2 πιέσεις
- ✓ **Πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς:** βασίζονται στο φαινόμενο της παραγωγής ηλεκτρικής τάσης σε έναν κρύσταλλο, όταν σε αυτόν επενεργεί μηχανική πίεση

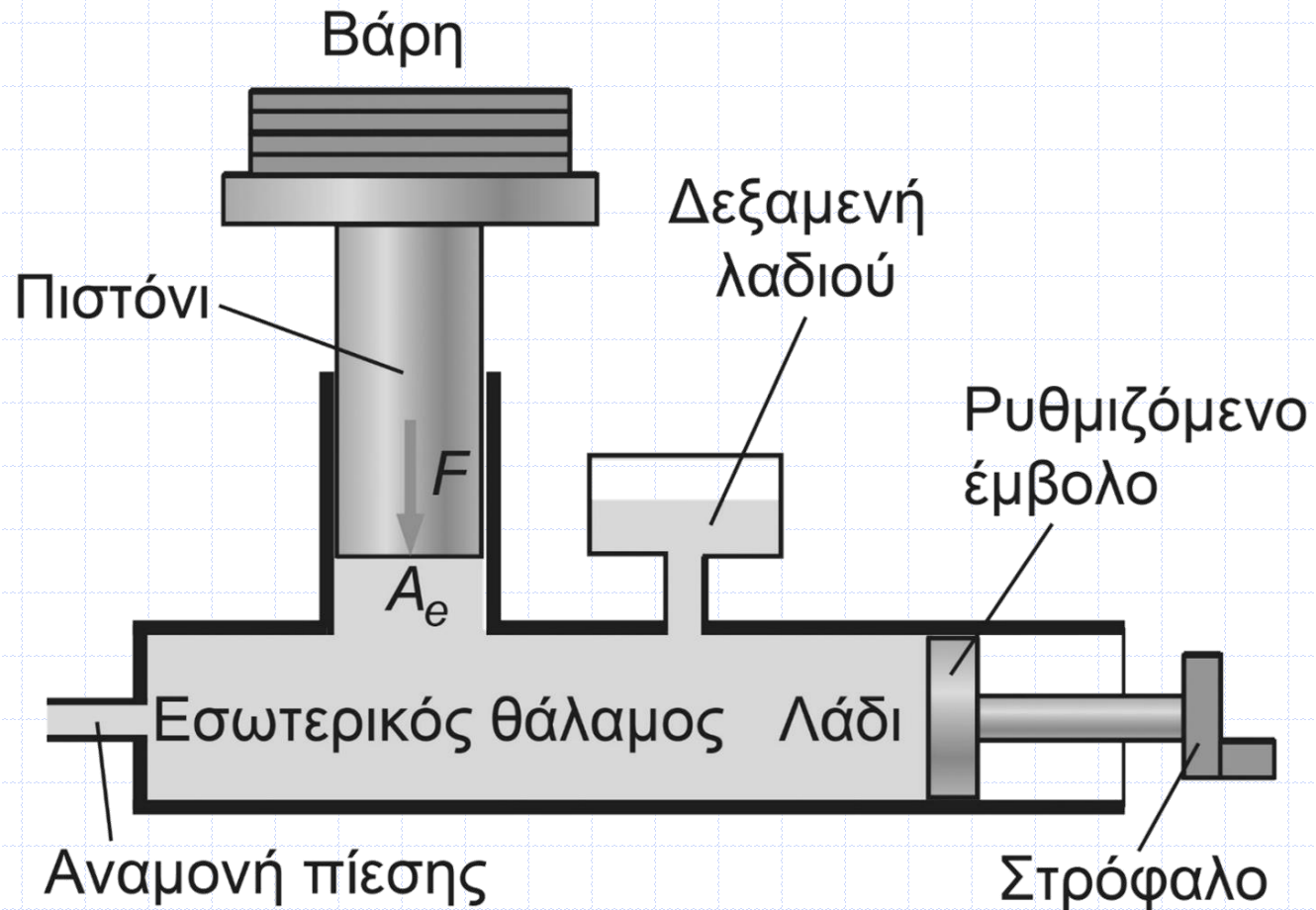
## Άλλες συσκευές μέτρησης της πίεσης

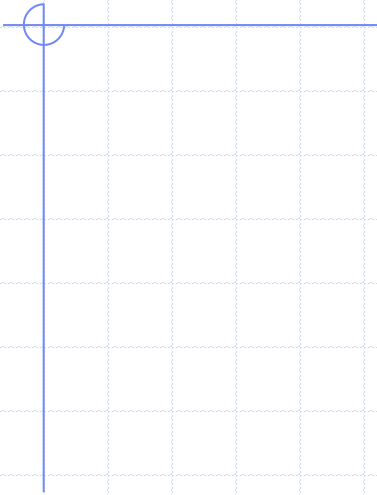


Διάφοροι τύποι σωλήνων Bourdon



# Ορισμοί...





***Βασικές έννοιες...***



# Βασικές έννοιες...

- Η Θερμοδυναμική ασχολείται με την ενέργεια και τους μετασχηματισμούς της
- Θερμοδυναμική είναι η επιστήμη που μελετά:
  1. Θερμοδυναμικά συστήματα
  2. Ενεργειακές καταστάσεις σε ισορροπία
  3. Συναλλαγές ενέργειας (έργο + θερμότητα)
- Ειδικοί κλάδοι: Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική και Φυσικοχημεία



# Βασικές έννοιες...

Η Θερμοδυναμική διακρίνεται σε:

- **Κλασική θερμοδυναμική**: Μελετά μακροσκοπικά φαινόμενα και δεν απαιτεί τη γνώση της συμπεριφοράς των μεμονωμένων σωματιδίων (π.χ. των μορίων)

(19ου αιώνα Clausius, Kelvin και Joule και το πρώτο μισό του 19ου αιώνα Carnot)

- **Στατιστική θερμοδυναμική**: Αποτελεί συνδυασμό στατιστικής μηχανικής, κινητικής θεωρίας, κβαντομηχανικής και στατιστικής προσεγγίζοντας λεπτομερώς τη μέση συμπεριφορά ενός μεγάλου πλήθους σωματιδίων

(Boltzmann και Gibbs στα τέλη του 19ου αιώνα)





# Βασικές έννοιες...

- Τα Αξιώματα είναι γενικοί περιορισμοί που θέτει η φύση στους μετασχηματισμούς της ενέργειας
- Τα Αξιώματα είναι πρωταρχικά και δεν μπορούν να προκύψουν από κάτι πιο θεμελιώδες
- Η διατύπωση των αξιωμάτων απαιτεί την χρήση εννοιών που είναι επίσης πρωταρχικές, και δεν έχουν ακριβείς ορισμούς



# Βασικές έννοιες...

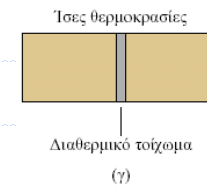
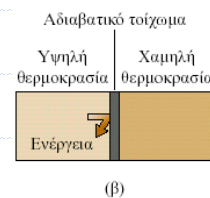
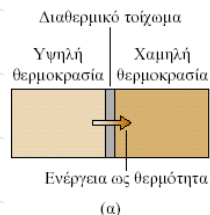
- Η **Ενέργεια** είναι μια αφηρημένη μαθηματική έννοια και δεν μπορεί να υπάρξει χωρίς τις απαραίτητες σχέσεις της με άλλες μεταβλητές ή συντεταγμένες που έχουν κάποια φυσική σημασία και μπορούν να μετρηθούν
  - ✓ Κινητική ενέργεια (ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας)
  - ✓ Πρώτο Θερμοδυναμικό αξίωμα (απλή δήλωση ότι η ενέργεια διατηρείται)
- Η **Ενέργεια** είναι η ικανότητα ενός συστήματος να μεταβάλλεται



# Βασικές έννοιες...

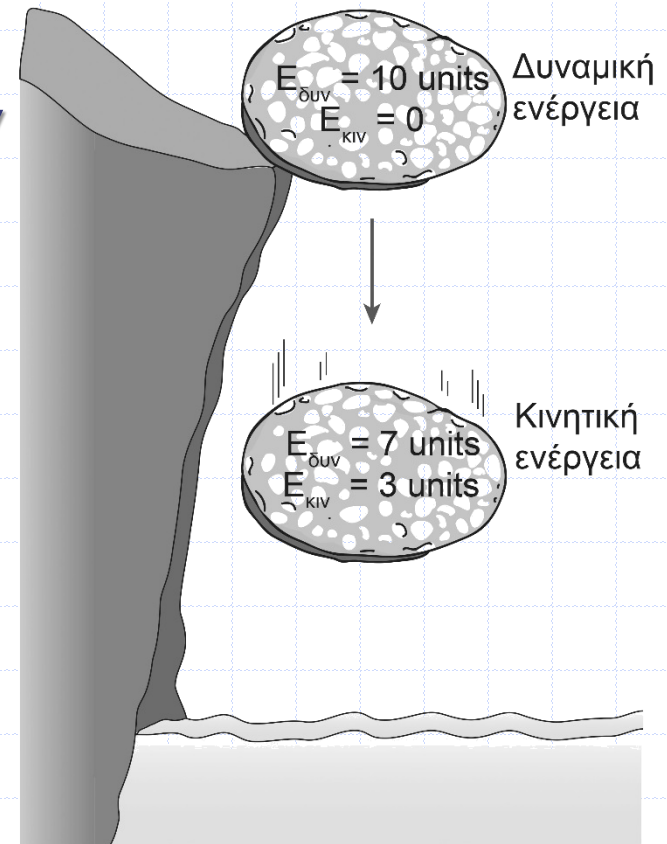
## □ Μηδενικό Θερμοδυναμικό αξίωμα

- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 1:** Όταν δύο (ή περισσότερα) συστήματα έρθουν σε επαφή μέσω διαθερμικών τοιχωμάτων, τότε μεταβάλλονται οι καταστάσεις τους και μετά την παρέλευση πεπερασμένου χρόνου δημιουργούνται νέες καταστάσεις ισορροπίας, που δε μεταβάλλονται πλέον  
Τότε ότι τα συστήματα βρίσκονται σε **θερμική ισορροπία**
- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 2:** Όταν δύο σώματα είναι σε θερμική ισορροπία προς ένα τρίτο σώμα, τότε είναι και σε θερμική ισορροπία μεταξύ τους  
Οι καταστάσεις των συστημάτων αυτών χαρακτηρίζονται από μια κοινή ιδιότητα που ονομάζεται **θερμοκρασία**
- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 3:** Δύο σώματα είναι σε θερμική ισορροπία, αν χαρακτηρίζονται από την ίδια θερμοκρασία, ακόμα κι αν δεν είναι σε επαφή  
Εάν **δεν υπάρχει** θερμική ισορροπία τότε **η ενέργεια ρέει από την περιοχή υψηλής θερμοκρασίας προς την περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας**



# Βασικές έννοιες...

- **Αρχή διατήρησης της ενέργειας:**  
Σε κάθε θερμοδυναμική μεταβολή, η ενέργεια μπορεί να μετασχηματίζεται από μια μορφή σε άλλη, αλλά η συνολική ποσότητα της ενέργειας παραμένει σταθερή
- Η ενέργεια ούτε δημιουργείται ούτε καταστρέφεται
- Πρώτο Θερμοδυναμικό αξίωμα είναι μια απλή δήλωση, ότι η ενέργεια διατηρείται



# Βασικές έννοιες...

## □ **Πρώτο Θερμοδυναμικό αξίωμα**

- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 1**: Υπάρχει μια μορφή ενέργειας, η εσωτερική ενέργεια  $U$ , που είναι ενυπάρχουσα ιδιότητα κάθε συστήματος και συνδέεται συναρτησιακά με τις μετρήσιμες ιδιότητες που καθορίζουν το σύστημα. Για κλειστό σύστημα, που δεν κινείται, οι μεταβολές της ιδιότητας δίνονται από τη σχέση

$$dU = \delta Q - \delta W$$

- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 2**: Η ολική ενέργεια κάθε συστήματος και του περιβάλλοντος του, θεωρουμένων ως σύνολο, παραμένει σταθερή
- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 3**: Η ενέργεια δεν χάνεται, μετατρέπεται από την μια μορφή στην άλλη χωρίς να καταστρέφεται



# Βασικές έννοιες...

## □ Ενθαλπία

- ✓ Η ποσότητα θερμότητας απλούστερη από τις θερμοδυναμικές συναρτήσεις είναι η Ενθαλπία, που είναι ιδιότητα, έχει μονάδες ενέργειας και ορίζεται από την σχέση

$$H = U + PV$$

- ✓ Όταν συμβαίνει μια διαφορική μεταβολή σε ένα σύστημα, οι ιδιότητες του μεταβάλλονται, οπότε η μεταβολή της ενθαλπίας  $H$  είναι:

$$dH = dU + d(PV)$$

Για σταθερή πίεση  $dH = dU + PdV$

Για μηχανικά αντιστρεπτή διεργασία σταθερής πίεσης

$$\delta W = PdV$$

$$\text{και } dU = \delta Q - \delta W \Rightarrow dH = \delta Q \text{ και } \Delta H = Q$$



# Βασικές έννοιες...

## ☐ Θερμοχωρητικότητα

- ✓ Σε μια αντιστρεπτή διεργασία, με πλήρως καθορισμένη διαδρομή, για ένα σύστημα PVT, ορίζεται η **Θερμοχωρητικότητα** από την σχέση

$$C_X = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_X$$

- ✓ Στα συστήματα PVT χρησιμοποιούνται η  **$C_V$**  θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο, και η  **$C_P$**  θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση, και για κλειστό, σταθερής σύστασης σύστημα, είναι:

$$C_V = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_V \quad dU = \delta Q \quad \Rightarrow \quad C_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \quad \Rightarrow \quad dU = C_V dT$$

Η θερμότητα που απαιτείται για να ανέβει η θερμοκρασία κατά  $dT$  **υπό σταθερό όγκο**

$$C_P = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_P \quad dH = \delta Q \quad \Rightarrow \quad C_P = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \quad \Rightarrow \quad dH = C_P dT$$

Η θερμότητα που απαιτείται για να ανέβει η θερμοκρασία κατά  $dT$  υπό **σταθερή πίεση**



# Βασικές έννοιες...

## □ Δεύτερο Θερμοδυναμικό αξίωμα

- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 1:** Υπάρχει μια ιδιότητα που ονομάζεται εντροπία  $S$ , που είναι ενυπάρχουσα ιδιότητα κάθε συστήματος και συνδέεται συναρτησιακά με τις μετρήσιμες ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το σύστημα
- ✓ Για μια αντιστρεπτή διεργασία οι μεταβολές της ιδιότητας δίνονται από τη σχέση

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 2:** Η μεταβολή της εντροπίας ενός συστήματος και του περιβάλλοντος του, θεωρουμένων ως σύνολο, είναι πάντοτε θετική και πλησιάζει το μηδέν για κάθε αντιστρεπτή διεργασία

Όλες οι φυσικές διεργασίες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της εντροπίας

$$\Delta S_{ολική} \geq 0$$

Ο δείκτης "ολική" σημαίνει ότι συμπεριλαμβάνονται το σύστημα και το περιβάλλον

Η ισότητα ισχύει μόνο στην οριακή περίπτωση της αντιστρεπτής διεργασίας





# Βασικές έννοιες...

## Πρώτο Θερμοδυναμικό Αξίωμα (Αρχή διατήρησης ενέργειας)

- ❑ Η ενέργεια δεν χάνεται, μετατρέπεται από την μια μορφή στην άλλη χωρίς να καταστρέφεται

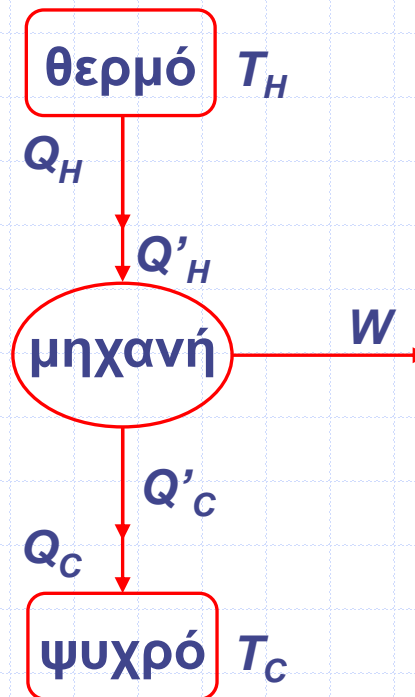
## Δεύτερο Θερμοδυναμικό Αξίωμα (Ποιότητα Ενέργειας)

- ❑ Δεν υπάρχει διάταξη που να μετατρέπει πλήρως την απορροφόμενη θερμότητα σε μηχανικό έργο
- ❑ Δεν είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας από μια θερμοκρασία σε άλλη υψηλότερη, χωρίς κατανάλωση έργου (*Clausius*)
- ❑ Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μηχανή, η οποία να λειτουργεί σε μια κυκλική επαναλαμβανόμενη διεργασία και να μην κάνει τίποτε άλλο από το να παίρνει ένα ποσό θερμότητας από κάποιο θερμοδοχείο και να παράγει ισοδύναμο έργο (*Kelvin – Planck*)



# Βασικές έννοιες...

- **Θερμική μηχανή** ή **κίνητηρας** ονομάζεται μια συσκευή ή διάταξη που παράγει έργο από τη θερμότητα εκτελώντας μια κυκλική διεργασία, δηλαδή, ανταλλάσσει θερμότητα με δύο θερμοδοχεία αλλά η ίδια παραμένει αμετάβλητη



# Βασικές έννοιες...

- ❑ Οι θερμικές μηχανές **Carnot** εργάζονται μεταξύ δύο σταθερών θερμοκρασιακών επιπέδων
- ❑ Οι εξισώσεις *Carnot* είναι:

$$\frac{Q_C}{T_C} = \frac{-Q_H}{T_H} \quad \text{και} \quad \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

και, εναλλακτικά

$$\left| \frac{Q_C}{Q_H} \right| = \frac{T_C}{T_H} \quad \text{και} \quad \left| \frac{W}{Q_H} \right| = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Ο λόγος της θερμότητας που απορρίπτεται από μια μηχανή Carnot είναι ίσος με τον λόγο των θερμοκρασιών

Θερμικός βαθμός απόδοσης  $\eta$  μιας θερμικής μηχανής *Carnot*

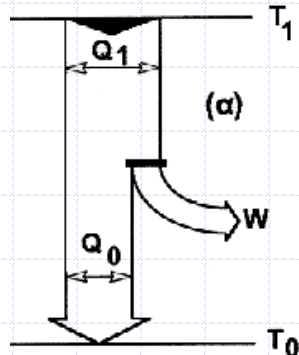
Για να μηδενιστεί η απορριπτόμενη θερμότητα  $|Q_C|$  πρέπει η  $T_C$  να είναι ίση με το απόλυτο μηδέν (0 K)

Όλες οι θερμικές μηχανές πρέπει να απορρίπτουν μέρος της θερμότητας που παίρνουν σε θερμοδοχεία ικανά να την παραλάβουν

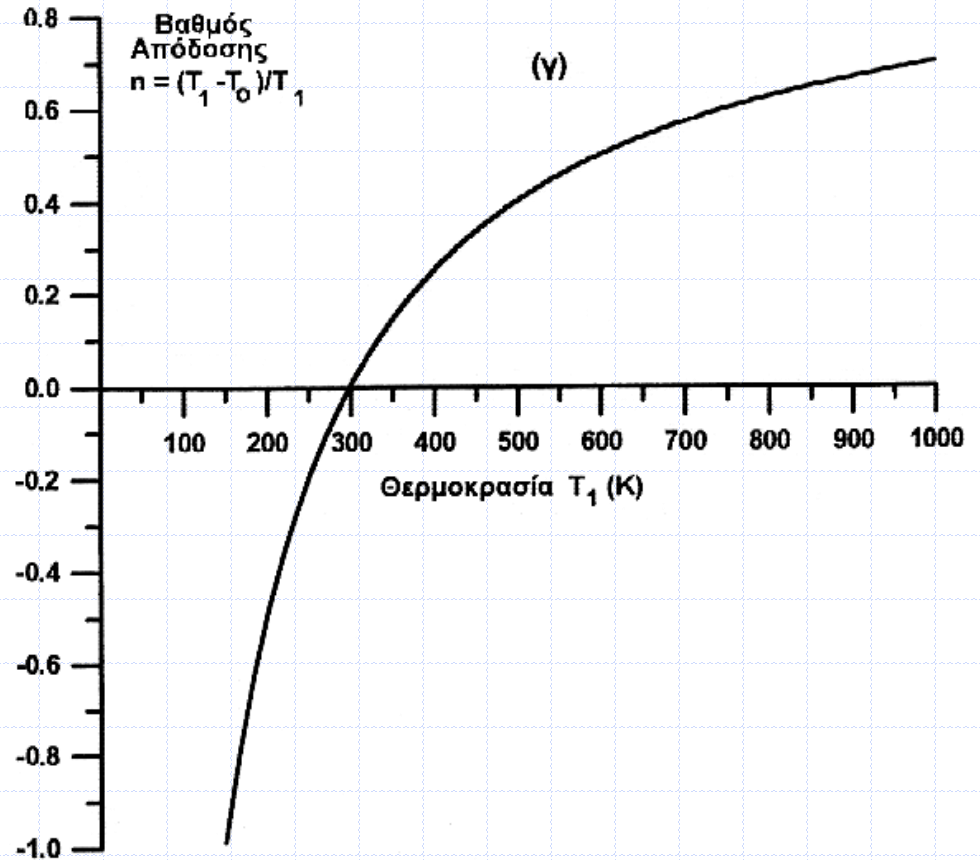
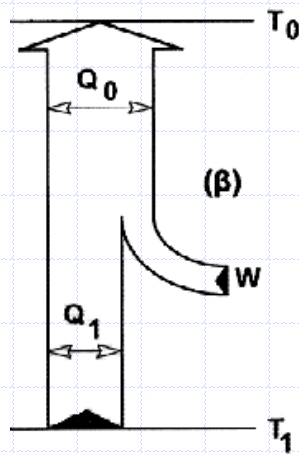


# Βασικές έννοιες...

(α) Κύκλος ισχύος



(β) Κύκλος ψύξης

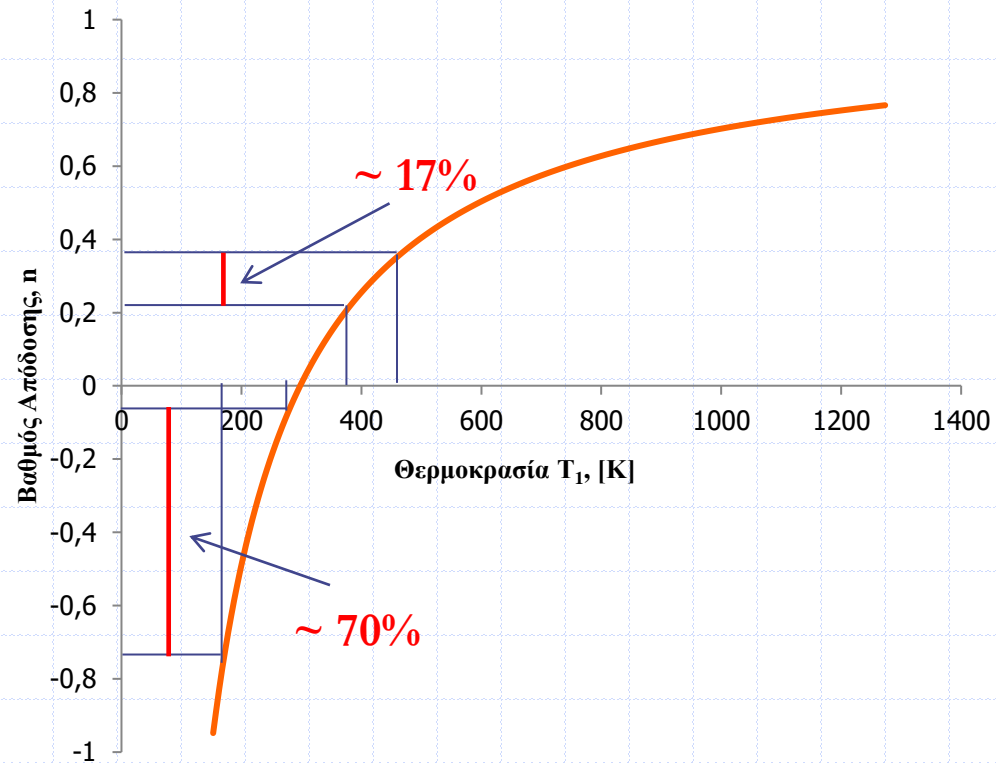


Μέγιστος βαθμός απόδοσης αντιστρεπτού κύκλου μετατροπής θερμότητας σε έργο



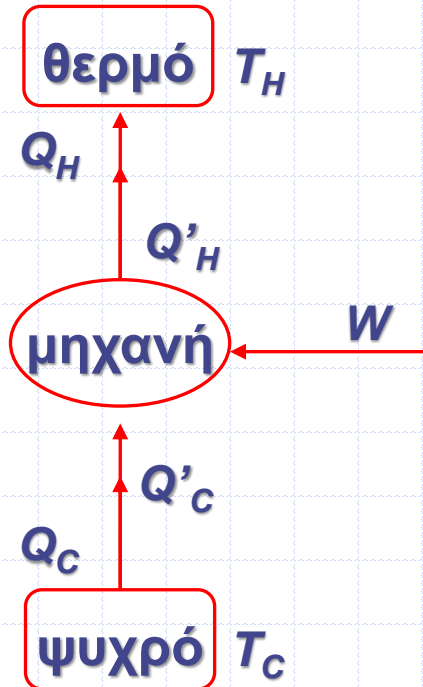
# Βασικές έννοιες...

$$n = \frac{T_1 - T_0}{T_1}$$



# Βασικές έννοιες...

- Μια αντιστρεπτή θερμική μηχανή μπορεί να αντιστραφεί, δηλ. να εργάζεται ως **αντλία θερμότητας** ή ψυγείο
- Ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις, με μόνη τη διαφορά ότι το έργο καταναλώνεται και χρησιμοποιείται για την «**άντληση**» θερμότητας από το ψυχρό προς το θερμό θερμοδοχείο



- Η ποσότητα  $|Q_c| / |W|$  είναι ο λόγος της θερμότητας που απομακρύνεται στη χαμηλή θερμοκρασία προς το έργο που απαιτείται
- **Βαθμός απόδοσης** ή **λόγος ψυκτικής ενέργειας**,  $n_{cool}$ :

$$n_{cool} = \frac{|Q_c|}{|W|} = \frac{T_c}{T_H - T_c}$$



# ***Συστήματα & όγκοι ελέγχου...***



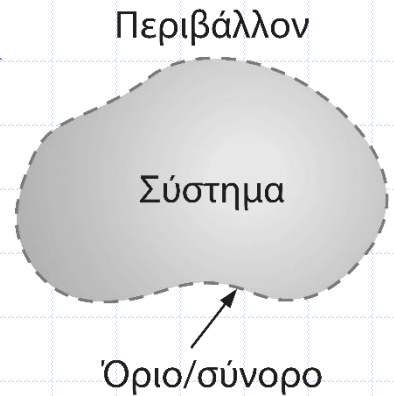
# Συστήματα & όγκοι ελέγχου...

- ❑ **Σύστημα:** Μια ποσότητα υλικού ή μια περιοχή του σύμπαντος που μελετάται μεμονωμένα
- ❑ **Περιβάλλον:** Η μάζα ή η περιοχή εκτός συστήματος
- ❑ **Οριακή επιφάνεια:** Τα φυσικά ή φανταστικά όρια που χωρίζουν το σύστημα από το περιβάλλον του
- ❑ Τα όρια ενός συστήματος μπορεί να είναι *σταθερά* ή *κινούμενα*
- ❑ Τα συστήματα μπορεί να είναι *κλειστά* ή *ανοιχτά*
- ❑ **Κλειστό σύστημα (μάζα ελέγχου):** Εμπεριέχει μια σταθερή ποσότητα μάζας. Από το όριο του συστήματος δε μπορεί να εισέλθει ή να εξέλθει μάζα

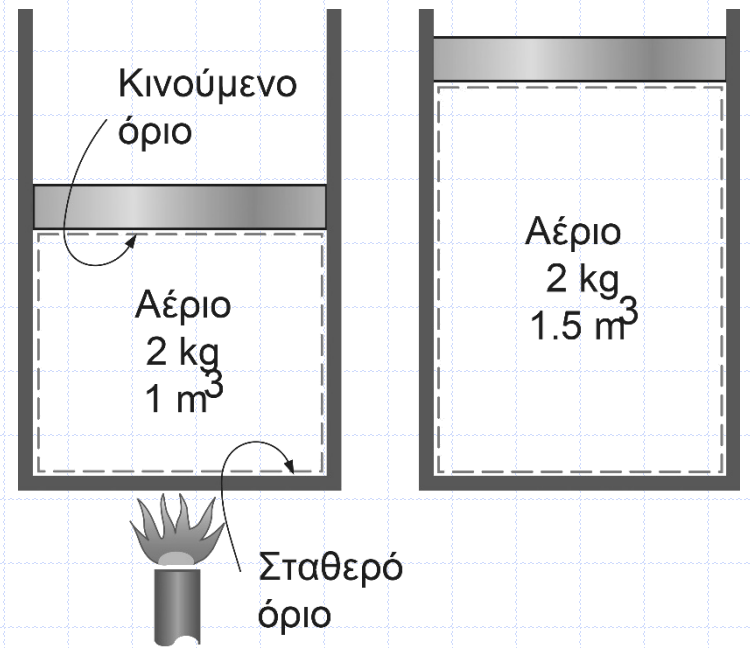
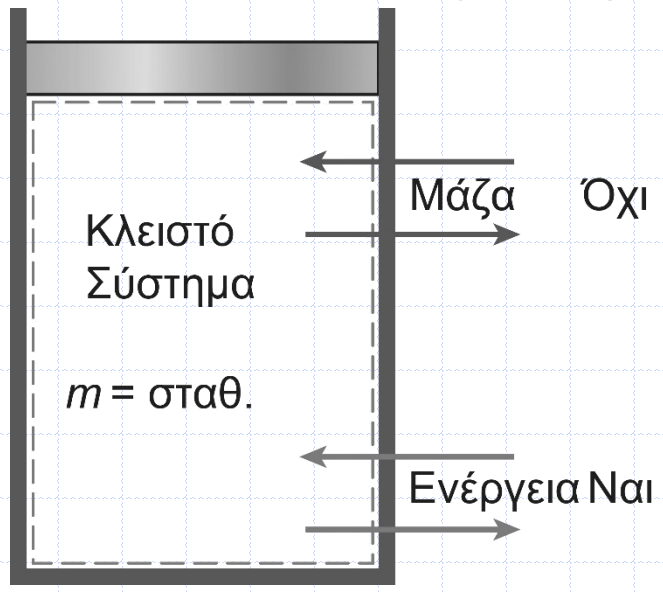




# Συστήματα & όγκοι ελέγχου...



Σύστημα, περιβάλλον και οριακή επιφάνεια



Κλειστό σύστημα μετακινούμενου ορίου

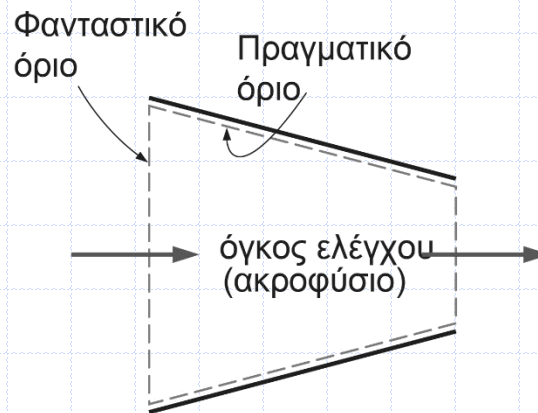
Η μάζα δε μπορεί να διαπεράσει το όριο ενός κλειστού συστήματος, όμως η ενέργεια μπορεί



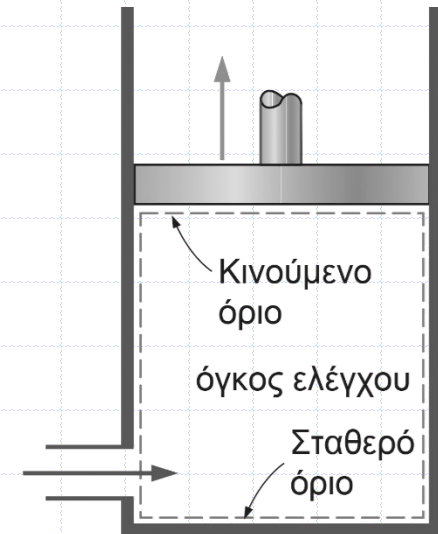
# Συστήματα & όγκοι ελέγχου...



- ❑ **Ανοιχτό σύστημα (όγκος ελέγχου):** Είναι μια κατάλληλα επιλεγμένη περιοχή
- ❑ Συνήθως περικλείει μια συσκευή που διακινεί μάζα, π.χ. συμπιεστή, στρόβιλο, ακροφύσιο, κλπ.
- ❑ Από τον όγκο ελέγχου διέρχονται μάζα κι ενέργεια
- ❑ Ένας όγκος ελέγχου μπορεί να έχει σταθερά, κινούμενα, φυσικά ή φανταστικά όρια
- ❑ **Επιφάνεια ελέγχου:** Είναι τα φυσικά ή φανταστικά όρια του όγκου ελέγχου.



(a) Ένας όγκος ελέγχου με πραγματικά και φανταστικά όρια



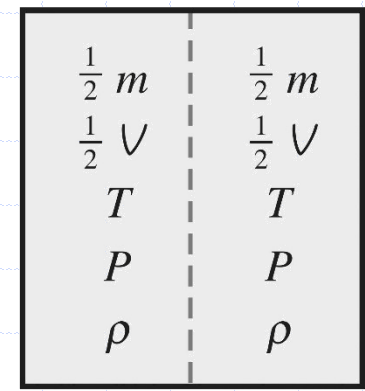
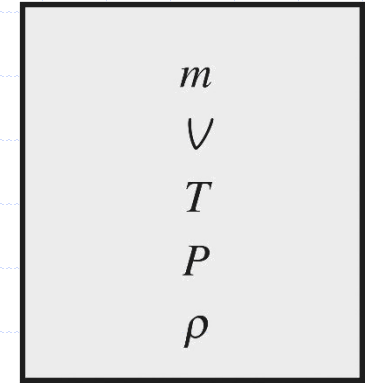
(b) Ένας όγκος ελέγχου με σταθερά και μετακινούμενα όρια



# Συστήματα & όγκοι ελέγχου...

- ❑ **Ιδιότητα:** κάθε μέγεθος που χαρακτηρίζει το σύστημα
- ❑ Γνωστές ιδιότητες είναι η πίεση  $P$ , η θερμοκρασία  $T$ , ο όγκος  $V$  κι η μάζα  $m$
- ❑ Οι ιδιότητες μπορεί να είναι **εντατικές** ή **εκτατικές**
- ❑ **Εντατικές ιδιότητες:** είναι οι ιδιότητες που δεν εξαρτώνται από τη μάζα ενός συστήματος (π.χ. θερμοκρασία, πίεση και πυκνότητα)
- ❑ **Εκτατικές ιδιότητες:** είναι εκείνες, των οποίων οι τιμές εξαρτώνται από την έκταση του συστήματος
- ❑ **Ειδικά μεγέθη:** είναι οι εκτατικές ιδιότητες, εκπεφρασμένες στη μονάδα της μάζας:

$$(v = V/m) \quad (e = E/m).$$



} Έκτατικές ιδιότητες  
 } Εντατικές ιδιότητες

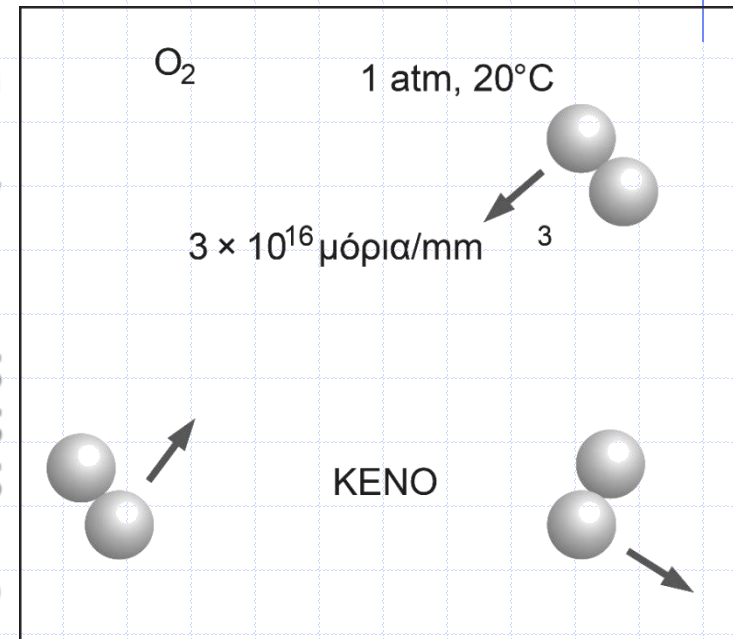
**Κριτήριο διαφοροποίησης εντατικών & εκτατικών ιδιοτήτων**



# Συστήματα & όγκοι ελέγχου...

## Θεωρία του συνεχούς μέσου

- Η ύλη αποτελείται από άτομα, τα οποία είναι πολύ αραιά στην αέρια φάση. Για την Τεχνική Θερμοδυναμική, είναι πολύ βολικό να παραβλεφθεί η ατομική υπόσταση των ουσιών και να θεωρηθούν ως συνεχή μέσα
- Το συνεχές μέσο μας επιτρέπει να χειριζόμαστε τις ιδιότητες ως σημειακές σχέσεις και να θεωρούμε ότι οι ιδιότητες μπορούν να μεταβάλλονται χωρίς ασυνέχειες στο χώρο
- Αυτή η απλούστευση είναι σωστή, μόνο όταν το μέγεθος του συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερο από τον χώρο μεταξύ των μορίων
- Όλα τα πρακτικά προβλήματα καλύπτουν αυτήν την προϋπόθεση
- Εδώ μελετώνται ουσίες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως συνεχή μέσα



Συνεχές μέσο

# Συστήματα & όγκοι ελέγχου...

## Πυκνότητα & ειδικό βάρος

**Πυκνότητα:**  $\rho = \frac{m}{V}$  (kg/m<sup>3</sup>)

**Ειδικός όγκος:**  $v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$

**Ειδική βαρύτητα:** είναι ο λόγος της πυκνότητας μιας ουσίας προς την πυκνότητα του νερού στους 4°C

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}}$$

**Πίνακας:** Ειδικό βάρος στους 0°C

Ουσία	ΕΒ
Νερό	1,0
Αίμα	1,05
Θαλασσινό νερό	1,025
Βενζίνη	0,7
Αιθυλική αλκοόλη	0,79
Υδράργυρος	13,6
Ξύλο	0,3 – 0,9
Χρυσός	19,2

$$V = 12 \text{ m}^3$$
$$m = 3 \text{ kg}$$



$$\rho = 0.25 \text{ kg/m}^3$$

$$v = \frac{1}{\rho} = 4 \text{ m}^3/\text{kg}$$

**Ειδικό βάρος:** είναι το βάρος ανά μονάδα όγκου μιας ουσίας

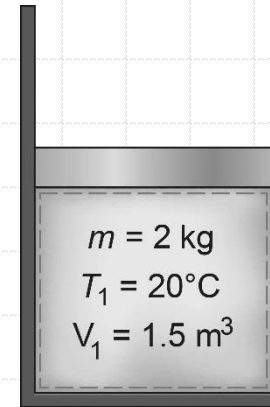
$$\gamma_s = \rho g \quad (\text{N/m}^3)$$

- ✓ Η πυκνότητα είναι ίση με τη μάζα ανά μονάδα όγκου
- ✓ Ο ειδικός όγκος είναι ίσος με τον όγκο ανά μονάδα μάζας

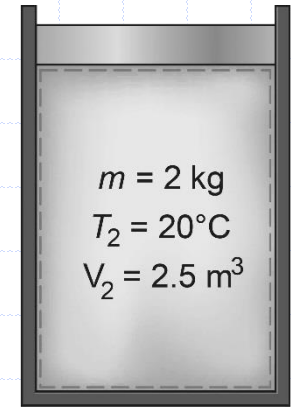
# Συστήματα & όγκοι ελέγχου...

## Ισορροπία

- ❑ Η **Θερμοδυναμική** ασχολείται με καταστάσεις ισορροπίας
- ❑ **Ισορροπία:** Κατάσταση ηρεμίας, όπου:
  - ✓ Όλες οι ιδιότητες του συστήματος έχουν σταθερές τιμές
  - ✓ Δεν υπάρχουν κινούμενες δυνάμεις εντός του συστήματος
- ❑ **Θερμική ισορροπία:** η θερμοκρασία είναι σταθερή καθ' όλο το σύστημα
- ❑ **Μηχανική ισορροπία:** η πίεση είναι σταθερή καθ' όλο το σύστημα
- ❑ **Ισορροπία φάσεων:** όταν το σύστημα περιέχει 2 φάσεις, η μάζα κάθε φάσης επιτυγχάνει μια σταθερή κατάσταση και παραμένει σε αυτήν
- ❑ **Χημική ισορροπία:** η χημική σύσταση του συστήματος δεν μεταβάλλεται χρονικά

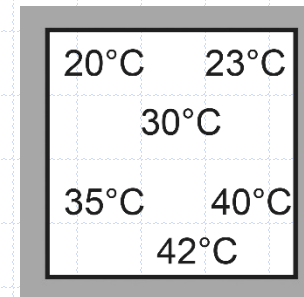


(α) Κατάσταση 1

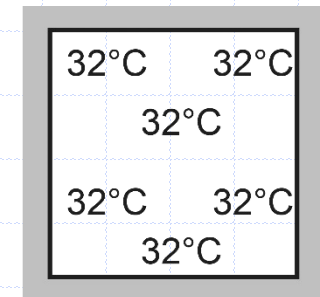


(β) Κατάσταση 2

Ένα σύστημα σε 2 διαφορετικές καταστάσεις



(α) Πριν



(β) Μετά

Ένα κλειστό σύστημα που καταλήγει σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας



# Συστήματα & όγκοι ελέγχου...

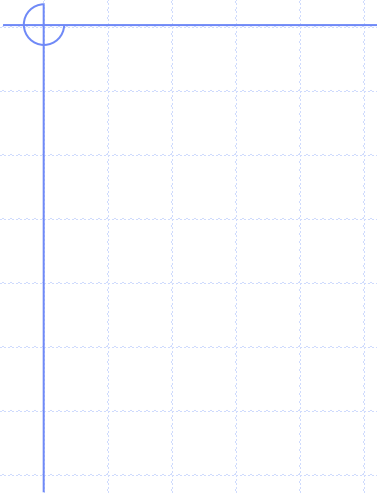
## Καταστατική αρχή

□ Ο αριθμός των ιδιοτήτων που απαιτούνται για τη γνώση της κατάστασης ενός συστήματος είναι ο **καθορισμός της κατάστασης**

✓ *Η κατάσταση ενός απλού συμπιεστού συστήματος καθορίζεται πλήρως από 2 εντατικές ιδιότητες (σύστημα PVT)*

□ **Απλό συμπιεστό σύστημα:** είναι ένα σύστημα που δεν περιλαμβάνει ηλεκτρικές, μαγνητικές και βαρυτικές αλληλεπιδράσεις, καθώς επίσης κι επιφανειακές τάσεις





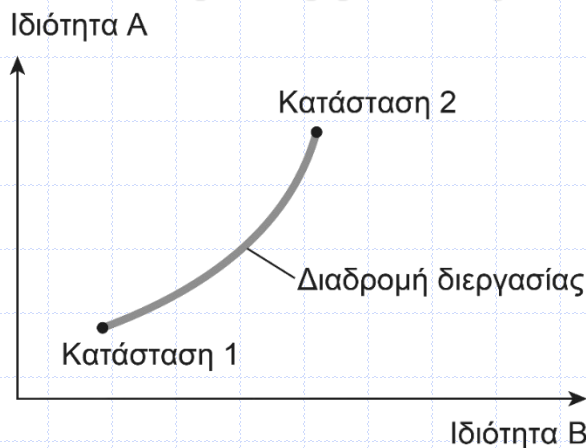
***Διεργασίες & κύκλοι...***





# Διεργασίες & κύκλοι...

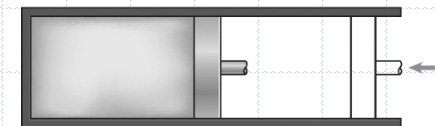
- **Διεργασία:** Κάθε μεταβολή, κατά την οποία ένα σύστημα μεταβαίνει από μια κατάσταση ισορροπίας σε μια άλλη
- **Διαδρομή:** Η ακολουθία των ενδιάμεσων καταστάσεων μιας διεργασίας  
*Για την πλήρη περιγραφή μιας διεργασίας, είναι απαραίτητη η γνώση της αρχικής και της τελικής κατάστασης, καθώς επίσης και της διαδρομής που ακολουθείται και των αλληλεπιδράσεων με το περιβάλλον*
- **Ψευδοστατική διεργασία:** Είναι μια διεργασία που εκτελείται κατά τρόπον ώστε το σύστημα να είναι απειροστά κοντά σε κατάσταση ισορροπίας καθ' όλο το χρόνο της διεργασίας



Μια διεργασία μεταξύ των καταστάσεων 1 & 2 κι η διαδρομή της



(a) Αργή συμπίεση  
(οιονεί ισορροπίας)



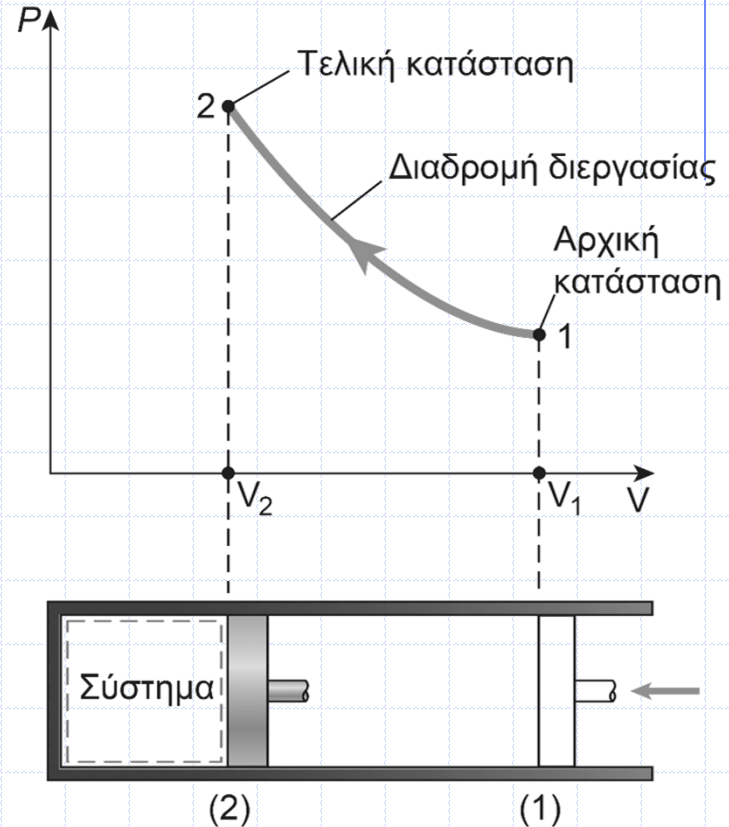
(b) Ταχύτατη συμπίεση  
(μη ψευδοστατική)

Ψευδοστατική και μη  
ψευδοστατική συμπίεση



# Διεργασίες & κύκλοι...

- ❑ Τα θερμοδυναμικά διαγράμματα είναι πολύ χρήσιμα για την οπτική παράσταση των διεργασιών
- ❑ Συνήθεις ιδιότητες, που χρησιμοποιούνται ως άξονες συντεταγμένων των θερμοδυναμικών διαγραμμάτων είναι η θερμοκρασία  $T$ , η πίεση  $P$  κι ο όγκος  $V$  (ή ο ειδικός όγκος  $v$ )
- ❑ Το πρόθεμα *ισο-* χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια διεργασία, κατά την οποία η αντίστοιχη ιδιότητα παραμένει σταθερή.
- ❑ **Ισοθερμοκρασιακή διεργασία:** η θερμοκρασία  $T$  παραμένει σταθερή.
- ❑ **Ισόθλιπτη διεργασία:** η πίεση  $P$  παραμένει σταθερή
- ❑ **Ισόογκη διεργασία:** ο ειδικός όγκος  $v$  παραμένει σταθερός
- ❑ **Κύκλος:** Ένα σύνολο διεργασιών, του οποίου η έναρξη και το πέρας του είναι το ίδιο σημείο

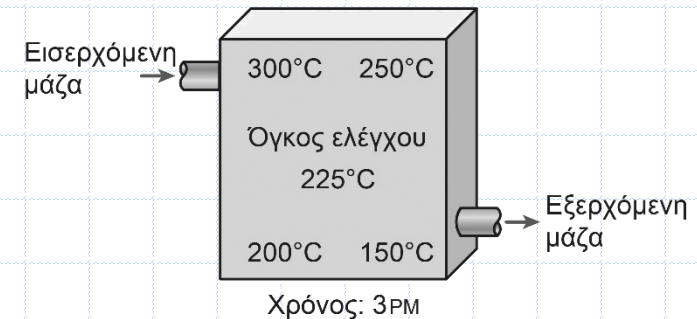
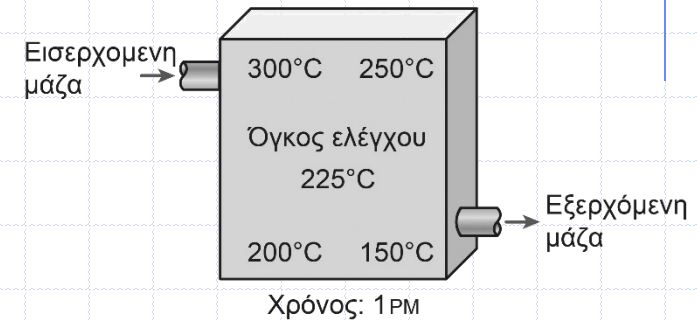


Διάγραμμα  $P$ - $V$  μιας διεργασίας συμπίεσης

# Διεργασίες & κύκλοι...

## Διεργασίες σταθεροποιημένης ροής

- Ο όρος **σταθεροποιημένος** υποδηλοί **χρονικά αμετάβλητος**, ενώ ο αντίθετος είναι **μεταβαλλόμενος**
- Πολλές μηχανές λειτουργούν για μεγάλα διαστήματα υπό τις ίδιες συνθήκες, συνεπώς θεωρούνται **συσκευές σταθεροποιημένες ροής**
- **Διεργασία σταθεροποιημένης ροής:** είναι μια διεργασία, κατά την οποία ένα ρευστό διέρχεται σταθεροποιημένα από έναν όγκο ελέγχου
- Οι συνθήκες σταθεροποιημένης ροής περιγράφουν με καλή ακρίβεια συσκευές που λειτουργούν για μεγάλα διαστήματα υπό τις ίδιες συνθήκες, όπως στρόβιλοι, αντλίες, λέβητες, συμπυκνωτές κι εναλλάκτες θερμότητας, ή θερμικοί σταθμοί και ψυκτικά συστήματα



Κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σταθεροποιημένης ροής, οι ιδιότητες του ρευστού ενδέχεται να μεταβάλλονται εντός του όγκου ελέγχου ως προς το χώρο, όχι όμως κι ως προς το χρόνο



# Διεργασίες & κύκλοι...



# Διεργασίες & κύκλοι...

- ❑ Ισοθερμοκρασιακή μεταβολή-διεργασία
- ❑ Ισόθλιπτη ή ισοβαρής μεταβολή-διεργασία
- ❑ Ισόχωρη ή ισόογκη μεταβολή-διεργασία
- ❑ Ισεντροπική μεταβολή-διεργασία
- ❑ Πολυτροπική μεταβολή-διεργασία
- ❑ Κυκλική μεταβολή

✓ Καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων

$$P V = n R T$$



# Διεργασίες & κύκλοι...

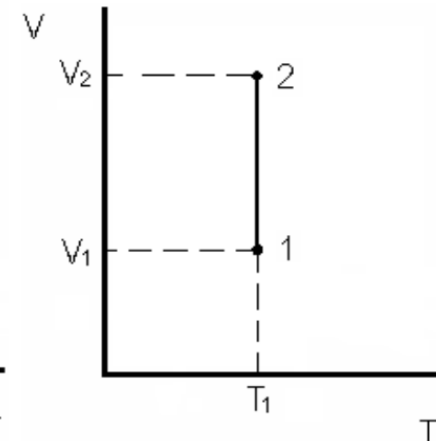
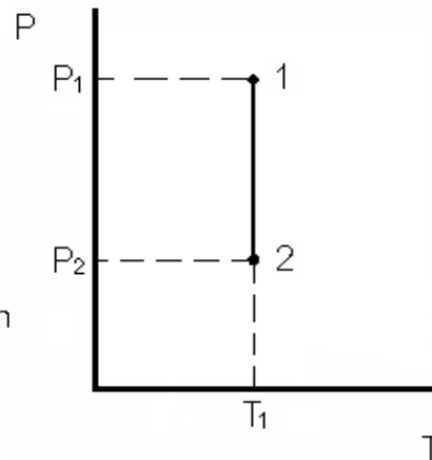
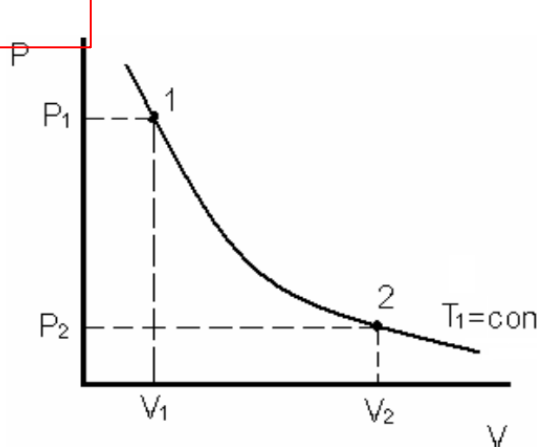
## □ Ισοθερμοκρασιακή μεταβολή-διεργασία

**Ισοθερμοκρασιακή:** Η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, κατά την οποία η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, ενώ μεταβάλλονται η πίεση και ο όγκος του αερίου

**Boyle (1662):** Η πίεση ορισμένης μάζας ιδανικού αερίου σε σταθερή θερμοκρασία, είναι αντιστρόφως ανάλογη του όγκου

Εξαρτάται από την θερμοκρασία  $T$  και τον αριθμό των moles  $c = nRT$

$$(P)_{n,T} = \frac{c}{V} \Rightarrow (PV)_{n,T} = c = \text{σταθερή}$$



# Διεργασίες & κύκλοι...

## Δ.1 Ισόθερμη Μεταβολή-Διεργασία

Ιδιότητες -Μεγέθη	Ειδικά μεγέθη	Κανονικά μεγέθη
Συνθήκη	$T_1=T_2=T$	$T_1=T_2=T$
Νόμος ισόθερμης (Νόμος Boyle)	$P_1v_1 = P_2v_2$	$P_1V_1 = P_2V_2$
Καταστατική εξίσωση	$Pv^1=c$	$P_1V_1=nR_uT$ και $P_2V_2=nR_uT$
Πολυτροπικός εκθέτης (n)	1	
Ειδική θερμότητα	$\infty$	
Μεταβολή εσωτερικής ενέργειας	$du=c_vdT=0$	$dU=0$
Μηχανικό έργο (ογκομεταβολής)	$w_{12}^b = \int_1^2 Pdv = P_1v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$	$W_{12}^b = nR_uT \ln \frac{V_2}{V_1} = mRT \ln \frac{V_2}{V_1}$
Τεχνικό έργο	$w_{12}^t = -\int_1^2 v dP = P_1v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$	$W_{12}^t = -\int_1^2 V dP = nR_u \ln \frac{V_2}{V_1}$
1 <sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος	$q_{12} = w_{12} + du \quad   \quad du = 0 \quad   \quad \Rightarrow \quad q_{12} = w_{12}$	$Q_{12} = W_{12} + \Delta U \quad   \quad \Delta U = 0 \quad   \quad \Rightarrow \quad Q_{12} = W_{12}$
Θερμότητα	$q_{12} = w_{12}$	$Q_{12} = W_{12}$
Μεταβολή ενθαλπίας	$dh = c_p dT = 0$	
Μεταβολή εντροπίας	$ds = \int_1^2 \frac{dq_{12}}{T} = R \ln \frac{v_2}{v_1}$	$dS = nR_u \ln \frac{V_2}{V_1} = mR \ln \frac{V_2}{V_1}$

# Διεργασίες & κύκλοι...

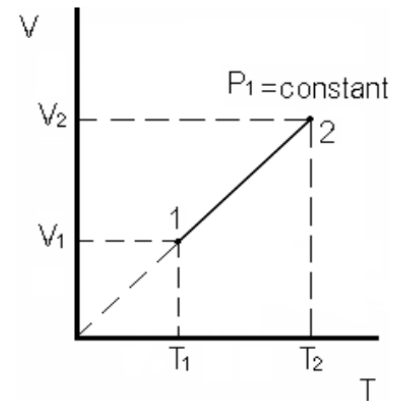
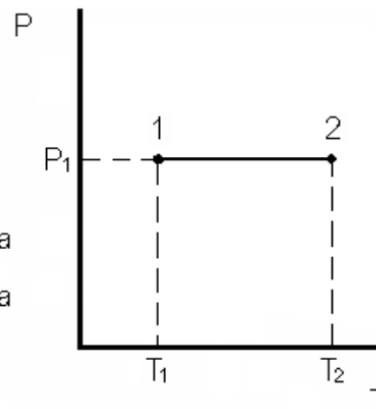
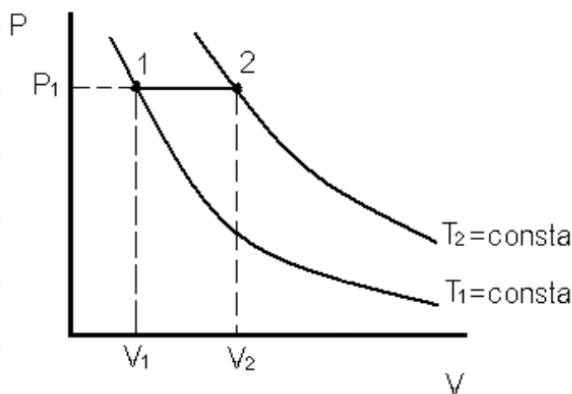
## □ Ισοβαρής μεταβολή-διεργασία

**Ισοβαρής ή ισόθλιπτη:** Η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, κατά την οποία η πίεση παραμένει σταθερή, ενώ μεταβάλλονται η θερμοκρασία και ο όγκος του αερίου

**Gay-Lussac (1802):** Ο όγκος ορισμένης μάζας ιδανικού αερίου σε σταθερή πίεση, είναι ανάλογος της θερμοκρασίας

Εξαρτάται από την θερμοκρασία  $T$  και τον αριθμό των moles

$$(V)_{n,P} = cT \Rightarrow \left(\frac{V}{T}\right)_{n,P} = c \quad c = \frac{nR}{T} \Rightarrow \frac{V}{T} = \frac{nR}{P}$$





# Διεργασίες & κύκλοι...

## Δ.2 Ισοβαρής Μεταβολή-Διεργασία

Ιδιότητες -Μεγέθη	Ειδικά μεγέθη	Κανονικά μεγέθη
Συνθήκη	$P_1=P_2=P$	$P_1=P_2=P$
Νόμος ισοβαρούς (Νόμος <i>Gay-Lussac</i> )	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$
Καταστατική εξίσωση	$PV^0=c$	$PV_1=nR_uT, PV_2=nR_uT_2$
Πολυτροπικός εκθέτης (n)	0	
Ειδική θερμότητα	$c_p$	$C_p$
Μεταβολή εσωτερικής ενέργειας	$du = c_vdT$	$dU = nC_vdT$
Μηχανικό έργο (ογκομεταβολής)	$w_{12}^b = \int_1^2 Pdv = P_1(v_2 - v_1)$	$W_{12}^b = P(V_2 - V_1)$
Τεχνικό έργο	$w_{12}^t = -\int_1^2 v dP = 0$	$W_{12}^t = -\int_1^2 V dP = 0$
1 <sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος	$q_{12} = w_{12} + du$	$Q_{12} = W_{12} + \Delta U$
Θερμότητα	$q_{12} = c_p dT$	$Q_{12} = nC_p dT$
Μεταβολή ενθαλπίας	$dh = c_p dT$	
Μεταβολή εντροπίας	$ds = \int_1^2 \frac{dq_{12}}{T} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$dS = nC_p \ln \frac{T_2}{T_1}$

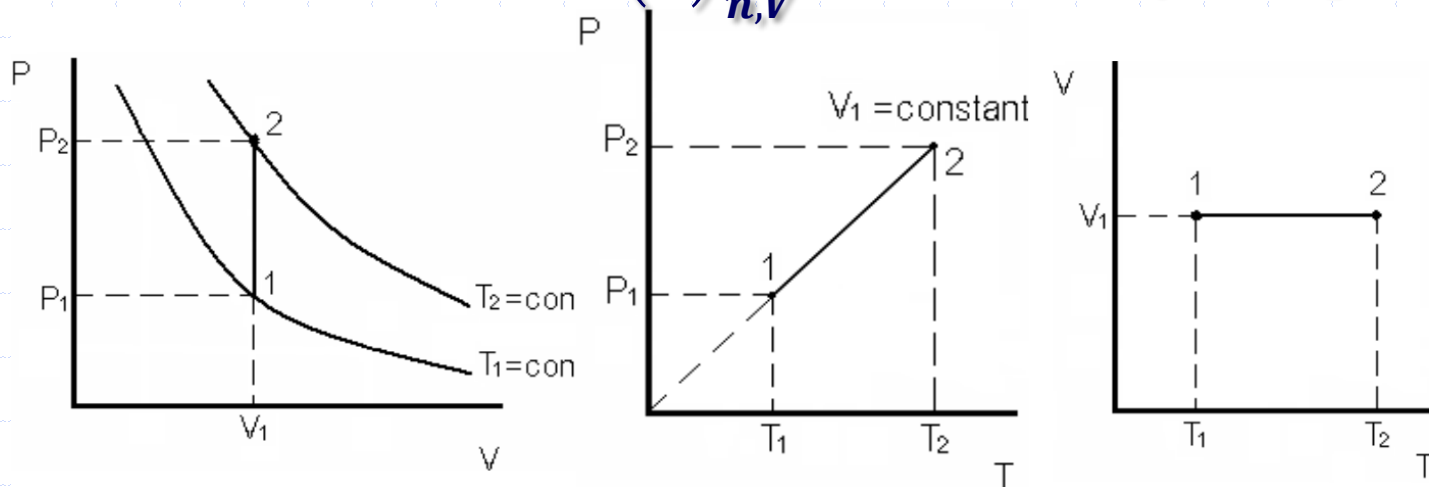
# Διεργασίες & κύκλοι...

## □ Ισόχωρη μεταβολή-διεργασία

**Ισόχωρη ή ισόογκη:** Η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, κατά την οποία ο όγκος παραμένει σταθερός, ενώ μεταβάλλονται η θερμοκρασία και η πίεση του αερίου

**Charles (1772):** Η πίεση ορισμένης μάζας ιδανικού αερίου υπό σταθερό όγκο, είναι ανάλογος της θερμοκρασίας

$$(P)_{n,V} = cT \Rightarrow \left(\frac{P}{T}\right)_{n,V} = c \quad c = \frac{nR}{V} \Rightarrow \frac{P}{T} = \frac{nR}{V}$$



# Διεργασίες & κύκλοι...

## Δ.3 Ισόχωρη Μεταβολή-Διεργασία

Ιδιότητες -Μεγέθη	Ειδικά μεγέθη	Κανονικά μεγέθη
Συνθήκη	$v_1=v_2=v$	$V_1=V_2=V$
Νόμος ισόχωρης (Νόμος <i>Charles</i> )	$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$	$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$
Καταστατική εξίσωση	$Pv^\alpha = c$	$P_1V=nR_uT_1$ και $P_2V=nR_uT_2$
Πολυτροπικός εκθέτης, $n$	$\infty$	
Ειδική θερμότητα	$c_v$	$C_v$
Μεταβολή εσωτερικής ενέργειας	$du=c_vdT$	$dU=nC_vdT$
Μηχανικό έργο (ογκομεταβολής)	$w_{12}^b = \int_1^2 Pdv = 0$	$W_{12}^b = P(V_2 - V_1)$
Τεχνικό έργο	$w_{12}^t = -\int_1^2 v dP = v(P_2 - P_1)$	$w_{12}^t = -\int_1^2 V dP = V(P_2 - P_1)$
1 <sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος	$q_{12} = du - w_{12} \mid \Rightarrow q_{12} = du$ $w_{12}=0$	$Q_{12}=W_{12}+\Delta U \mid \Rightarrow Q_{12}=\Delta U$ $W_{12}=0$
Θερμότητα	$q_{12} = c_vdT$	$Q_{12} = nC_vdT$
Μεταβολή ενθαλπίας	$dh = c_pdT$	
Μεταβολή εντροπίας	$ds = \int_1^2 \frac{dq_{12}}{T} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	$dS = nC_v \ln \frac{T_2}{T_1}$

# Διεργασίες & κύκλοι...

## □ Αδιαβατική ή Ισεντροπική μεταβολή-διεργασία

**Αδιαβατική ή ισεντροπική:** Η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, κατά την οποία δεν συμβαίνει οποιαδήποτε ανταλλαγή θερμότητας του αερίου (σύστημα) με το περιβάλλον

**Poisson:** Για μια ορισμένη μάζας ιδανικού αερίου σε μια αδιαβατική μεταβολή ( $Q = 0$ ) ισχύει:

$$PV^k = c \quad \text{όπου} \quad k = \frac{C_P}{C_V}$$

Επομένως, όταν μια ποσότητα μεταβάλλεται αδιαβατικά  $1 \rightarrow 2$ , ισχύει:

$$\begin{array}{l} P_1 V_1^k = P_2 V_2^k \\ PV = nRT \end{array} \quad \left| \quad \Rightarrow \frac{nRT_1}{V_1} V_1^k = \frac{nRT_2}{P_2} V_2^k \Rightarrow T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1}$$

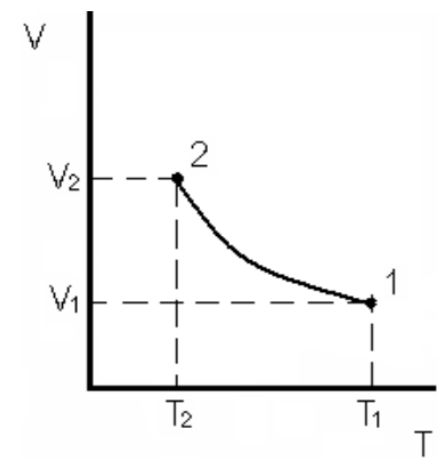
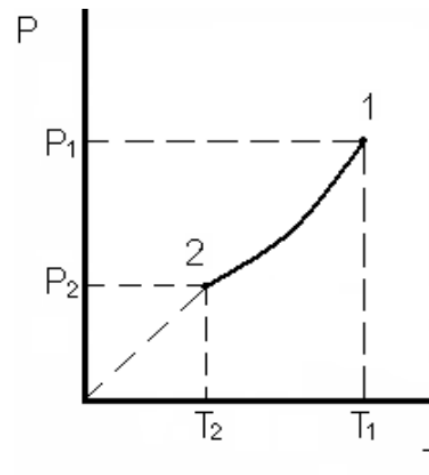
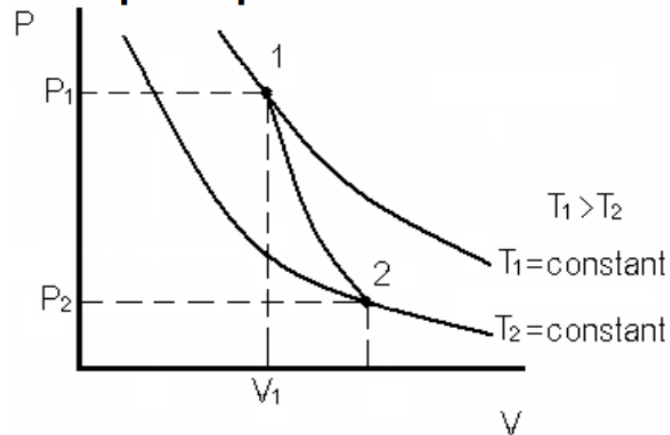
$$\Rightarrow P_1 \left( \frac{nRT_1}{P_1} \right)^k = P_2 \left( \frac{nRT_2}{P_2} \right)^k \Rightarrow P_1^{k-1} T_1^k = P_2^{k-1} T_2^k$$



# Διεργασίες & κύκλοι...

## □ Αδιαβατική ή Ισεντροπική μεταβολή-διεργασία

Αδιαβατική :



# Διεργασίες & κύκλοι...

## Δ.4 Ισεντροπική (=Αδιαβατική + Αντιστρεπτή) Μεταβολή-Διεργασία

Ιδιότητες -Μεγέθη	Ειδικά μεγέθη	Κανονικά μεγέθη
Συνθήκη	$q_{12} = 0$	$Q_{12} = 0$
Νόμος αδιαβατικής	$P_1 v_1^\gamma = P_2 v_2^\gamma$ $T_1 v_1^{\gamma-1} = T_2 v_2^{\gamma-1}$ $P_1^{1-\gamma} T_1^\gamma = P_2^{1-\gamma} T_2^\gamma$	$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$ $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$ $P_1^{1-\gamma} T_1^\gamma = P_2^{1-\gamma} T_2^\gamma$
Καταστατική εξίσωση	$Pv^\gamma = c, \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1}$	$P_1 V_1 = nR_u T_1$ $P_2 V_2 = nR_u T_2$
Πολυτροπικός εκθέτης, n	$\gamma$	
Ειδική θερμότητα	0	0
Μεταβολή εσωτερικής ενέργειας	$du = c_v dT$	$dU = nC_v dT$
Μηχανικό έργο (ογκομεταβολής)	$w_{12}^b = \int_1^2 P dv = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-\gamma}$	$W_{12} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-\gamma}$
Τεχνικό έργο	$w_{12}^t = -\int_1^2 v dP = \gamma \left( \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-\gamma} \right)$	$w_{12}^t = -\int_1^2 V dP = \gamma \left( \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-\gamma} \right)$
1 <sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος	$q_{12} = du - w_{12} \mid \Rightarrow w_{12} = -du$ $q_{12} = 0$	$Q_{12} = W_{12} + \Delta U \mid \Rightarrow W_{12} = -\Delta U$ $Q_{12} = 0$
Θερμότητα	$q_{12} = 0$	$Q_{12} = 0$
Μεταβολή ενθαλπίας	$dh = c_p dT$	
Μεταβολή εντροπίας	$ds = \int_1^2 \frac{dq_{12}}{T} = 0$	$dS = 0$

# Διεργασίες & κύκλοι...

## □ Πολυτροπική μεταβολή-διεργασία

**Πολυτροπική**: Η μεταβολή εισάγεται για να περιγράψει μεταβολές που δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως ισόθερμη, ισοβαρής ή ισόχωρη, αλλά ούτε και τυχαία. Διέπεται από την σχέση:

Πολυτροπικός  
εκθέτης

$$PV^n = c$$

Αποτελεί γενίκευση των νόμων που διέπουν τις προαναφερθείσες μεταβολές



# Διεργασίες & κύκλοι...

## Δ.5 Πολυτροπική Μεταβολή-Διεργασία

Ιδιότητες -Μεγέθη	Ειδικά μεγέθη	Κανονικά μεγέθη
Συνθήκη	$P_1 v_1^n = P_2 v_2^n$	$PV^n=c$
Νόμος πολυτροπικής	$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$	
Καταστατική εξίσωση	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$	$P_1 V_1 = nR_u T_1$ $P_2 V_2 = nR_u T_2$   $\Rightarrow \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$
Πολυτροπικός εκθέτης (n)	n=γ αδιαβατική, n=0 ισοβαρής n=1 ισόθερμη n=∞ ισόχωρη	
Ειδική θερμότητα	$c_n = c_v \left(\frac{n-\gamma}{n-1}\right)$	
Μεταβολή εσωτερικής ενέργειας	$du = c_v dT$	$dU = nC_v dT$
Μηχανικό έργο (ογκομεταβολής)	$w_{12} = \int_1^2 P dv = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{n-1}$	$W_{12} = P(V_2 - V_1)$
Τεχνικό έργο	$w_{12}^t = -\int_1^2 v dP = n \left(\frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{n-1}\right)$	
1 <sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος	$q_{12} = du - w_{12}$	$Q_{12} = W_{12} + \Delta U$
Θερμότητα	$q_{12} = c_n dT$	$Q_{12} = nC_n dT$
Μεταβολή ενθαλπίας	$dh = c_p dT$	
Μεταβολή εντροπίας	$ds = \int_1^2 \frac{dq_{12}}{T} = c_n \ln \frac{T_2}{T_1}$	$dS = -nC_n \ln \frac{T_2}{T_1}$

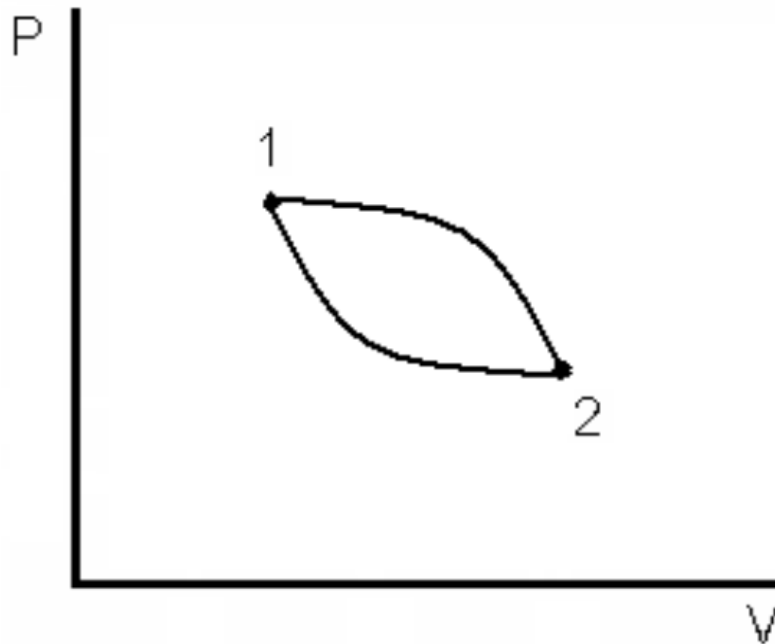




# Διεργασίες & κύκλοι...

## □ Κυκλική μεταβολή

**Κυκλική:** Μια συνεχής, κλειστή μεταβολή, που αποτελείται από τυχαίες ή όχι μεταβολές, στην οποία ταυτίζονται η αρχική και τελική κατάσταση



# Θερμοδυναμική Ι

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

