



Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

# Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Σχολή Μηχανικών Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Γ' εξάμηνο

## Μάθημα Εφαρμ. Θερμοδυναμική Ι/ 5<sup>η</sup> Ενότητα μαθήματος: 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος

Διδάσκουσα Δρ. Κατερίνα Βαβουράκη

## Google..search

Διδακτικά βιβλία για τους σπουδαστές της Ανώτατης Δημόσιας Σχολής Εμπορικού Ναυτικού (Α.Δ.Σ.Ε.Ν.):

1) Εφαρμοσμένη θερμοδυναμική (γ' έκδοση)

&

2) Παράρτημα τεχνικής Θερμοδυναμικής

## ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Ζ. ΠΑΓΩΝΑΡΗ

γ' έκδοση

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



**Εφαρμοσμένη θερμοδυναμική (γ' έκδοση)**  
Το βιβλίο αυτό απευθύνεται στους Μηχανικούς του Εμπορικού Ναυτικού και περιλαμβάνει τα βασικά λειτουργικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά μηχανών και μηχανημάτων όπως οι ΜΕΚ, οι στρόβιλοι, οι αεροσυμπιεστές, οι αεριοστρόβιλοι, οι ψυκτικές εγκαταστάσεις κ.ά.. Ο Μηχανικός του Εμπορικού Ναυτικού καλείται μέσω της Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής να εφαρμόσει στην πράξη τις αρχές και τους νόμους βάσει των οποίων λειτουργούν οι μηχανικές εγκαταστάσεις του πλοίου.

**Βιβλίο: Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική, Κ.Ζ. ΠΑΓΩΝΑΡΗ ΑΘΗΝΑ 2020**



ΑΝΩΤΕΡΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΣ ΣΧΟΛΕΣ  
ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

**Κωνσταντίνου Ζ. Παγωνάρη**  
ΠΛΟΙΑΡΧΟΥ (Μ)Π.Ν.  
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ-ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ Ν. Ρ.Γ.Σ. ΗΠΑ



### Παράρτημα τεχνικής Θερμοδυναμικής

Το τεύχος αυτό αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του βιβλίου «Τεχνική Θερμοδυναμική», διότι περιλαμβάνει τους πίνακες και τα διαγράμματα που είναι απαραίτητα για την επίλυση των ασκήσεων επί της ύλης του βιβλίου. Ο διαχωρισμός των πινάκων και διαγραμμάτων από το βιβλίο κρίθηκε απαραίτητος, προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους σπουδαστές στις γραπτές εξετάσεις.

**Βιβλίο: Παράρτημα Τεχνικής Θερμοδυναμικής, Κ.Ζ. ΠΑΓΩΝΑΡΗ ΑΘΗΝΑ 2002**

<https://eclass.hmu.gr/>

στο μάθημα:

ΕΦΑΡΜ. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ Ι Γ' εξαμ. (2021-22) (MECH215)

<https://eclass.hmu.gr/courses/MECH215/>

*Password:* thermodynamics1

➤ **15 βδομάδες, 4ώρες/ βδομάδα= 60ώρες συνολικά**

Σύμφωνα με το **Πρόγραμμα Σπουδών 2019** του Τμήματος **Μηχ/Μηχ/ΕΛΜΕΠΑ**  
Υλη μαθήματος:

1. Θεμελίωση των βασικών ενεργειακών μεγεθών, ορισμοί. Η έννοια του πεπερασμένου συστήματος και οι νόμοι της θερμοδυναμικής, εισαγωγική περιγραφή
2. Καταστατικά μεγέθη και καταστατικές εξισώσεις. Οι καθαρές ουσίες, φάσεις της ύλης. Το ιδανικό αέριο, η έννοια της ισορροπίας, η σταθερά του ιδανικού αερίου και η καταστατική εξίσωσή του
3. Οι μεταβολές ιδανικού αερίου
4. Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος, μετατροπή θερμότητας σε έργο
5. Θερμοδυναμικοί κύκλοι, Υπολογισμοί έργου και βαθμού απόδοσης
6. Η έννοια της Εντροπίας, Περιγραφή και ανάλυση θερμοδυναμικών κύκλων σε πεδία πίεσης – όγκου και ενθαλπίας – εντροπίας
7. Ο Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος. Ανάλυση θερμοδυναμικών κύκλων κινητήριων μηχανών και αντλίας θερμότητας
8. Αλλαγή φάσεων και εισαγωγή στην θερμοδυναμική των μιγμάτων
9. Γενίκευση της έννοιας της εντροπίας, Αναφορές στην στατιστική μηχανική και στην θεωρία της πληροφορίας
10. Ενέργεια και πληροφορία, σχεδιασμός θερμοδυναμικών συστημάτων
11. Από την Στατιστική Μηχανική στην Κοσμολογία, το εύρος ισχύος των νόμων της Θερμοδυναμικής και οι εφαρμογές του μηχανικού σήμερα και αύριο



## Ενότητες μαθήματος:

Βασικές έννοιες- Ορισμοί

Πρώτος Νόμος Θερμοδυναμικής

Ιδιότητες καθαρής ουσίας

Ιδανικά αέρια- Διεργασίες- Κλειστό Θερμοδυναμικό σύστημα

Ανοιχτό Θερμοδυναμικό σύστημα- Διεργασίες

Δεύτερος Νόμος Θερμοδυναμικής, Αναστρεψιμότητα

Εντροπία

Θερμοδυναμικοί κύκλοι

**5<sup>η</sup> Ενότητα μαθήματος:** 2ος Θερμοδυναμικός νόμος



## 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος

- 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος
- Αναστρεψιμότητα
- Βαθμός απόδοσης μηχανής
- Κύκλος και μηχανή Carnot- Βαθμός απόδοσης κύκλου Carnot



## 2ος Θερμοδυναμικός νόμος

Διατύπωση από τους  
**Kelvin** και **Planck**

Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί θερμική μηχανή που να μετατρέπει όλη την προσφερόμενη θερμότητα σε έργο.

Διατύπωση από τον  
**Clausius**

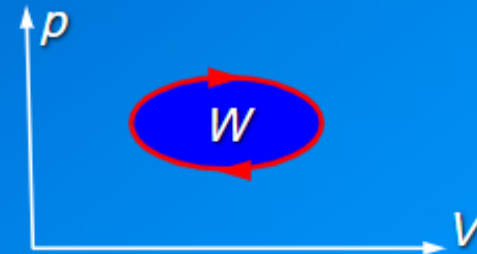
Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μηχανή που να μεταφέρει θερμότητα από ένα ψυχρό σώμα σε ένα θερμότερο χωρίς να δαπανηθεί ενέργεια για τη λειτουργία της.

## Θερμικές μηχανές – Βασικές αρχές λειτουργίας

Για να λειτουργήσει μια θερμική μηχανή θα πρέπει το «μέσο» που περιέχει, να εκτελέσει μια κυκλική μεταβολή κατά την οποία θα παράγει κάποια ποσότητα έργου.

Αυτή η κυκλική μεταβολή λέγεται **κύκλος** της μηχανής και μπορεί να γίνει από δεκάδες, μέχρι και χιλιάδες φορές το δευτερόλεπτο.

Αν το μέσο ήταν αέριο που έκανε αντιστρεπτή μεταβολή, ο κύκλος της μηχανής θα μπορούσε να είναι αυτός του σχήματος, και το έργο που παράγει ίσο με τη χρωματισμένη επιφάνεια.



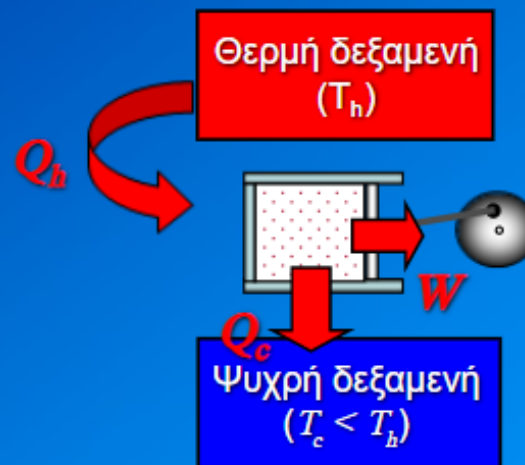
Βέβαια στη πράξη το «μέσο» δεν πραγματοποιεί αντιστρεπτές μεταβολές και μάλιστα μερικές φορές δεν είναι καν αέριο (στις ατμομηχανές χρησιμοποιείτο νερό που γινόταν ατμός).

Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι κατασκευαστές προσπαθούν να έχουν τη μέγιστη απόδοση σε κάθε κύκλο του «μέσου».

## Θερμικές μηχανές – Συντελεστής απόδοσης

Σε γενικές γραμμές μια θερμική μηχανή αποτελείται:

- ▶ Από μια θερμή δεξαμενή που προσφέρει θερμότητα  $Q_h$  στη μηχανή
- ▶ Ένα έμβολο με το οποίο η μηχανή παράγει έργο  $W$
- ▶ Μια ψυχρή δεξαμενή στην οποία αποβάλλεται η θερμότητα  $Q_c$  που περισσεύει



**Συντελεστή απόδοσης** ( $n$ ) οποιασδήποτε μηχανής ονομάζουμε το πηλίκο της ωφέλιμης ενέργειας που παράγει η μηχανή, προς τη ενέργεια που δαπανούμε για να λειτουργήσει. Ισχύει:  $n < 1$

Στη περίπτωση της θερμικής μηχανής:

$$n = \frac{W}{Q_h}$$

Κι επειδή  
 $W = Q_h - |Q_c|$ ,  
έχουμε:

$$n = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h}$$

## 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος

ο συντελεστής απόδοσης μιας μηχανής είναι μικρότερος της μονάδας ( $\eta < 1$ ). Καθ' όλη τη διάρκεια του 18<sup>ου</sup> αιώνα, αλλά και κατά τον 19<sup>ο</sup>, τους φυσικούς και μηχανικούς τους ταλάνιζε το ερώτημα: «Θα μπορούσε να φτιαχτεί μια θερμική μηχανή, της οποίας ο συντελεστής ( $\eta$ ) να είναι ίσος με μονάδα ( $\eta = 1$ );» Το ζήτημα λύθηκε το 1859 από το λόρδο Kelvin:

### Δεύτερος Θερμοδυναμικός νόμος

«Είναι αδύνατον να φτιαχτεί θερμική μηχανή η οποία να μετατρέπει εξ' ολοκλήρου τη θερμότητα σε έργο»

Ο παραπάνω νόμος θεωρείται ο ισχυρότερος νόμος της Φυσικής. Διατυπώθηκε διαφορετικά από τον Γερμανό Κλαούζιους:

### Δεύτερος Θερμοδυναμικός νόμος

«Είναι αδύνατον να φτιαχτεί θερμική μηχανή η οποία να μεταφέρει θερμότητα από ψυχρό σώμα σε ένα θερμότερο, χωρίς τη δαπάνη ενέργειας»

\*Οι δύο διατυπώσεις του νόμου θεωρούνται ισοδύναμες



## Συνέπειες του 2<sup>ου</sup> Θερμοδυναμικού νόμου

Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος είχε μεγαλύτερες συνέπειες από το να θέσει τέρμα στο «όνειρο της τέλειας θερμικής μηχανής».

Πολύ πιο σημαντική ήταν η συμβολή του στο να καθορίσει την κατεύθυνση προς την οποία συμβαίνουν τα φαινόμενα αυθόρμητα στη φύση.

Μπορεί π.χ. να δαπανήσουμε ενέργεια για να μεταφέρουμε θερμότητα από ένα ψυχρό σώμα προς ένα θερμότερο (όπως στο ψυγείο), αλλά αν αφήσουμε αυθόρμητα τη φύση, η ενέργεια θα μεταφερθεί πάντοτε από το θερμό προς το ψυχρότερο σώμα.

Γενικότερα, όπως διατυπώθηκε και από τον Κλαύζιους, η φύση αν αφεθεί να δράσει αυθόρμητα, τείνει πάντα να αυξήσει την αταξία σε ένα σύστημα.

## Μηχανή Carnot



Το 1824, ο Γάλλος μηχανικός Καρνό απέδειξε ότι, ειδικά οι θερμικές μηχανές, όχι μόνο δεν μπορούν έχουν συντελεστή απόδοσης ίση με μονάδα, όπως απεδείχθη από τον 2<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό νόμο, αλλά στην πραγματικότητα ο μέγιστος ιδανικός συντελεστής απόδοσης τους είναι πολύ μικρότερος.

Για να το αποδείξει αυτό, επινόησε μια μηχανή, η οποία αν κινηθεί μεταξύ δύο θερμοκρασιών  $T_h$  (της θερμής δεξαμενής) και  $T_c$  (της ψυχρής), θα έχει τον μεγαλύτερο δυνατόν συντελεστή απόδοσης.

Η μηχανή αυτή ονομάστηκε μηχανή Carnot και η απόδοση της αποτελεί το ανώτερο όριο μεταξύ όλων των άλλων μηχανών.

Συνεπώς:

Δεν μπορεί να υπάρξει θερμική μηχανή που να έχει μεγαλύτερη απόδοση από μια μηχανή Carnot η οποία λειτουργεί ανάμεσα στις ίδιες θερμοκρασίες.

Ο S. Carnot (Καρνό) παρατήρησε ότι για να παράγει έργο μια ατμομηχανή, θα πρέπει να υπάρχει ροή θερμότητας από μια θερμή πηγή με υψηλή θερμοκρασία, προς μια άλλη ψυχρή πηγή με χαμηλότερη θερμοκρασία.

Επίσης παρατήρησε, ότι όσο η διαφορά της θερμοκρασίας των δύο αυτών πηγών ήταν μεγαλύτερη, τόσο μεγαλύτερο ήταν και το παραγόμενο έργο.

**Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος ή αρχή του Carnot (Καρνό)** καθορίζει, ότι η θερμότητα ρέει από μόνη της από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα σώματα και ποτέ αντιστρόφως.



## 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος (7/26)

Ο νόμος αυτός εξηγεί τη βασική λειτουργία των θερμικών μηχανών, στις οποίες εκμεταλευόμαστε τη διαφορά της θερμοκρασίας η οποία υπάρχει μεταξύ ενός θερμού και ενός ψυχρού σώματος.

Ο νόμος αυτός καθορίζει επιπλέον ότι ...

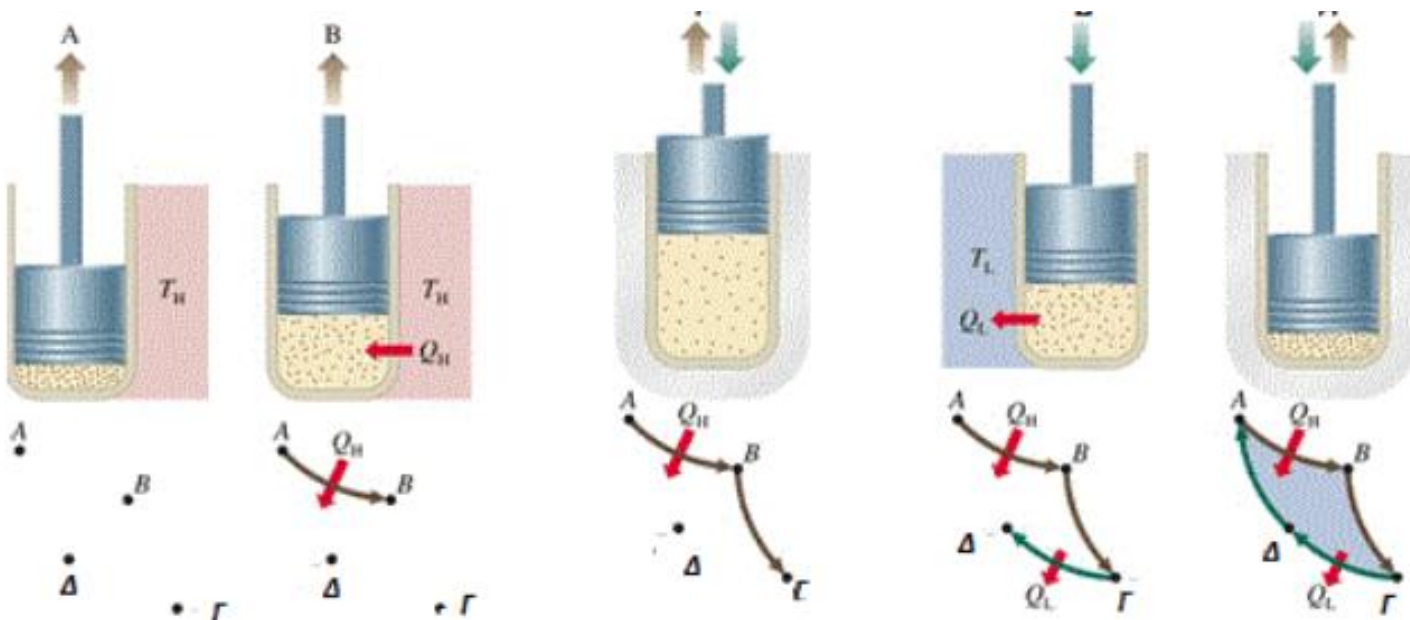
Ο νόμος αυτός καθορίζει επιπλέον ότι η απόδοση μιας θερμικής μηχανής είναι, πάντοτε, ένας αριθμός μικρότερος της μονάδας, ακόμα και όταν η μηχανή είναι τέλεια.

Αυτό σημαίνει, ότι μόνο ένα μέρος της θερμότητας που παραλαμβάνει η μηχανή από το θερμό σώμα, μπορεί να μετατραπεί σε μηχανικό έργο.



## 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος (8/26)

Ο κύκλος Carnot αποτελείται από τις εξής τέσσερις αντιστρεπτές μεταβολές, δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές.



### Οι τέσσερις φάσεις του κύκλου Carnot

- α)** Μια **ισόθερμη εκτόνωση**  $A \rightarrow B$  στην υψηλή θερμοκρασία  $T_h$ , οπότε το αέριο απορροφά θερμότητα  $Q_h$ , και παράγει έργο  $W_1$ .
- β)** Μια **αδιαβατική εκτόνωση**  $B \rightarrow \Gamma$ , οπότε το αέριο παράγει έργο  $W_2$  και ταυτόχρονα ψύχεται στην χαμηλή θερμοκρασία  $T_c$ .
- γ)** Μια **ισόθερμη συμπίεση**  $\Gamma \rightarrow \Delta$  στη χαμηλή θερμοκρασία  $T_c$ , οπότε το αέριο αποβάλλει θερμότητα  $Q_c$  και δαπανάει έργο  $W_3$ .
- δ)** Μια **αδιαβατική συμπίεση**  $\Delta \rightarrow A$ , οπότε το αέριο δαπανάει έργο  $W_4$  και ταυτόχρονα θερμαίνεται στη θερμοκρασία  $T_h$ .

## Μηχανή Carnot- Αρχές λειτουργίας

Μια μηχανή Carnot εκτελεί μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή η οποία αποτελείται:

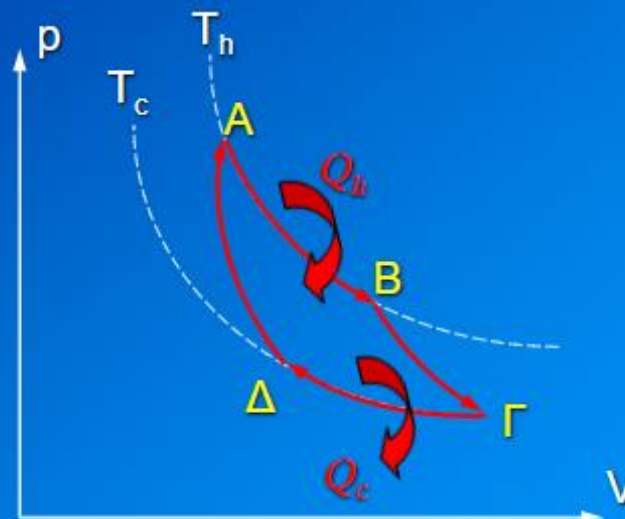
- ▶ Μια ισόθερμη εκτόνωση AB σε θερμοκρασία  $T_h$ , κατά την οποία μεταφέρεται θερμότητα  $Q_h$  από τη θερμή δεξαμενή στο αέριο
- ▶ Μια αδιαβατική εκτόνωση BΓ κατά την οποία το αέριο κρυώνει στη θερμοκρασία  $T_c$
- ▶ Μια ισόθερμη συμπίεση ΓΔ σε θερμοκρασία  $T_c$ , κατά την οποία αποβάλλεται θερμότητα  $Q_c$  από το αέριο στη ψυχρή δεξαμενή
- ▶ Μια αδιαβατική συμπίεση ΔΑ κατά την οποία το αέριο θερμαίνεται στην αρχική θερμοκρασία  $T_h$

Αποδεικνύεται ότι:

$$\frac{|Q_c|}{Q_h} = \frac{T_c}{T_h}$$

Οπότε έχουμε για τον συντελεστή απόδοσης της μηχανής Carnot:

$$\eta = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$



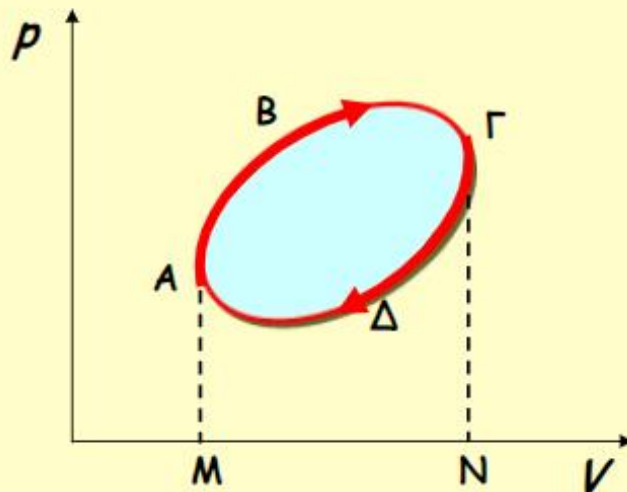
Η απόδοση της μηχανής μεγαλώνει, όσο μεγαλύτερη γίνεται η διαφορά μεταξύ του θερμού και του ψυχρού σώματος.

Επειδή, όμως, ως ψυχρό σώμα χρησιμοποιείται συνήθως το περιβάλλον (νερό ή αέρας ψύξης), γίνεται φανερό, ότι στην πράξη

η απόδοση μιας μηχανής εξαρτάται από τη θερμοκρασία του θερμού μόνο σώματος, και η οποία πρέπει να είναι, όσο το δυνατό, μεγαλύτερη.

## Κυκλική μεταβολή


$$Q = W$$



$$\Delta U_{ολ} = 0$$

Σε **δεξιόστροφη** κυκλική μεταβολή το ολικό έργο είναι θετικό ( $W_{ολ} > 0$ ), ενώ σε **αριστερόστροφη** είναι αρνητικό ( $W_{ολ} < 0$ ).



## 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος (12α/26)

Ισόθερμη μεταβολή

**ΠΡΟΣΟΧΗ!!** R (atm.L/mol.K)

$$\Delta U = 0$$

$$W = nRT \ln \frac{V_{\text{τελ}}}{V_{\text{αρχ}}}$$

$$Q = W$$

Ισόχωρη μεταβολή

$$W = 0$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$$

$$Q = \Delta U$$

Ισοβαρής μεταβολή

$$\Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$$

$$W = p \cdot \Delta V$$

$$Q = \frac{3}{2} nR\Delta T + p \cdot \Delta V$$





## Αδιαβατική διεργασία

Γενικά για μία αδιαβατική διεργασία έχουμε ότι:

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$$

Αποδεικνύονται..

$$\frac{v_2}{v_1} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{1/(k-1)}$$

ή

$$\frac{V_2}{V_1} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{1/k-1}$$

ή

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{k/(k-1)}$$

$$v, \text{ ειδικός όγκος } \left( \frac{m^3}{kg} \right) = \frac{V(m^3)}{m(kg)}$$

$$pv = RT \text{ or } pV = mRT$$

$$c_p - c_v = R$$

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$W_{12} = m \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1 - k}$$

ή

$$W_{12} = mR \frac{T_2 - T_1}{1 - k}$$

ή

$$W = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - k}$$

2→3 Αδιαβατική εκτόνωση

4→1 Αδιαβατική συμπίεση

Προσοχή στους δείκτες!!

## Βαθμός απόδοσης κύκλου Carnot

Από την ανάλυση του κύκλου Carnot αποδεικνύεται ότι το **καθαρό έργο** που παράγεται δίνεται από τη σχέση\*:

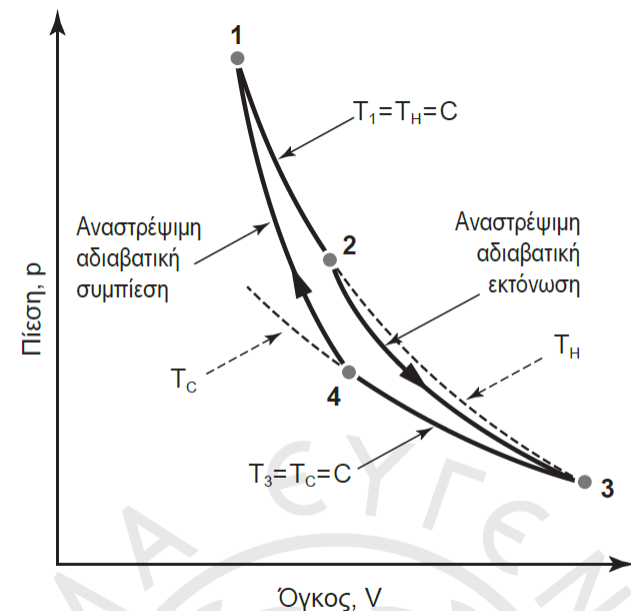
$$W = mRT_H \ln \frac{V_2}{V_1} + mRT_C \ln \frac{V_4}{V_3} \quad (7.6)$$

όπου:  $T_H$ ,  $T_C$  η θερμοκρασία του θερμού και του ψυχρού σώματος που έρχεται σε επαφή με τον κύλινδρο, αντίστοιχα.

Η **θερμότητα** που δίνεται με σταθερή θερμοκρασία στον κύλινδρο από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 και αυτή που αφαιρείται από την κατάσταση 3 στην κατάσταση 4, δίνονται από τις σχέσεις:

$$Q_{12} = mRT_H \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (7.7)$$

$$Q_{34} = mRT_C \ln \frac{V_4}{V_3} \quad (7.8)$$



**Σχ. 7.5**

Το διάγραμμα p - V για τον κύκλο Carnot

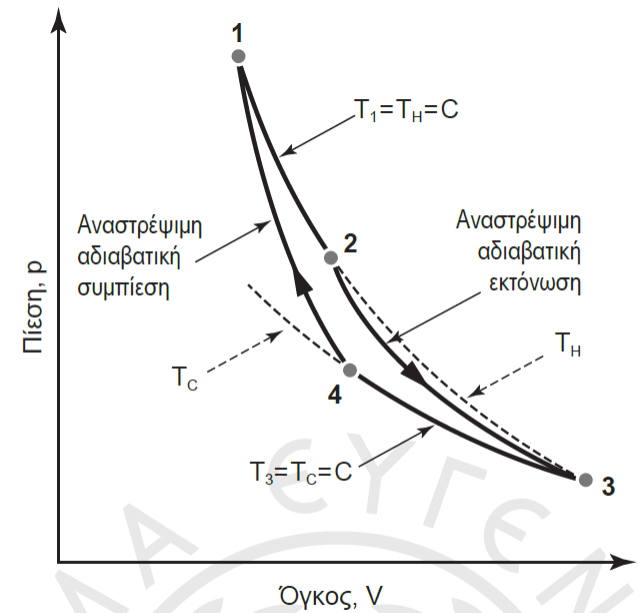
## Βαθμός απόδοσης κύκλου Carnot

ο βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι:

$$\eta_{\theta} = \frac{Q_{12} - Q_{34}}{Q_{12}} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

$$\eta_{\theta} = \frac{T_H - T_C}{T_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

$$\eta_{\theta} = 1 - \left( \frac{p_4}{p_1} \right)^{(k-1)/k} = 1 - \left( \frac{u_1}{u_4} \right)^{k-1} = 1 - \frac{T_3}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_1}$$



**Σχ. 7.5**

Το διάγραμμα p - V για τον κύκλο Carnot



### Μηχανή Carnot- Αριθμητικό παράδειγμα

Μηχανή Carnot λειτουργεί ανάμεσα στις θερμοκρασίες  $T_h=400\text{ K}$  και  $T_c=300\text{ K}$ . Σε κάθε κύκλο απορροφά θερμότητα  $Q_h = 4000\text{ J}$  από τη θερμή δεξαμενή. Υπολογίστε την απόδοση της μηχανής, το έργο που παράγει και τη θερμότητα που προσφέρει στη ψυχρή δεξαμενή σε κάθε κύκλο.

#### ΛΥΣΗ

- ▶ Ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής είναι:

$$n = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{300}{400} = 0.25$$

- ▶ Συνεπώς το έργο που παράγει το αέριο είναι:

$$W = nQ_h = 0.25 \cdot 4000\text{ (J)} = 1000\text{ J}$$

- ▶ Και στην ψυχρή δεξαμενή αποδίδεται:

$$W = Q_h - Q_c \Rightarrow Q_c = Q_h - W \Rightarrow Q_c = 4000 - 1000 = 3000\text{ J}$$

## Συμπερασματικά για τον κύκλο Carnot

1) Ο κύκλος αυτός αποτελείται από δύο αναστρέψιμες διεργασίες (εκτόνωση και συμπίεση) και δύο ισοθερμοκρασιακές αλλαγές κατάστασης, που, όπως είπαμε προηγουμένως, είναι επίσης αναστρέψιμες. Συνεπώς μπορεί να λειτουργήσει και κατά την αντίθετη διεύθυνση, είναι δηλαδή **αναστρέψιμος**.

2) Από την εξίσωση (7.10) βλέπουμε ότι ο βαθμός απόδοσης αυξάνει όσο ο λόγος  $T_C/T_H$  μειώνεται. Αυτό μπορούμε να το επιτύχουμε αυξάνοντας τη θερμοκρασία  $T_H$  και μειώνοντας συγχρόνως τη θερμοκρασία  $T_C$  όσο είναι δυνατό. Οι δυνατότητες όμως του ανθρώπου να επεμβαίνει στη φύση είναι αρκετά περιορισμένες. Έτσι η αφαίρεση της θερμότητας  $Q_{34}$  από τον κύλινδρο, φάση 3-4, στην πράξη γίνεται μέσα σε ένα ψυγείο όπου η θερμοκρασία συνήθως είναι της τάξης των  $20^\circ\text{C}$ , δηλαδή  $t = 20^\circ\text{C}$  ή  $T_C = 293\text{ K}$ . Αντίστοιχα, το ανώτερο όριο της θερμοκρασίας  $T_H$  στην οποία δίνουμε τη θερμότητα  $Q_{12}$  στον κύλινδρο, μπορεί να φτάσει μέχρι και  $1650^\circ\text{C}$ . Η θερμοκρασία αυτή στην πράξη είναι αρκετά μικρότερη για λόγους αντοχής των υλικών.

## Συμπερασματικά για τον κύκλο Carnot

3) Από την εξίσωση (7.10) βλέπουμε ότι για να επιτύχουμε μία μηχανή με απόδοση 100%, θα πρέπει η θερμοκρασία  $T_C$  να φτάσει το απόλυτο μηδέν, πράγμα φυσικά αδύνατο. Γι' αυτό τέτοια μηχανή είναι αδύνατο να κατασκευαστεί.

4) Η πρακτική εφαρμογή της μηχανής Carnot εξαρτάται από την αργή κίνηση των εξαρτημάτων, έτσι ώστε το εργαζόμενο μέσο να έχει σε κάθε στιγμή της λειτουργίας ομοιόμορφη πίεση και θερμοκρασία. Αυτό μπορεί να γίνει στην πράξη, αλλά τότε θα έχουμε μία πολύ μεγάλη μηχανή που θα μας δίνει πολύ μικρή ισχύ, κι αυτό γιατί η ισχύς μιας μηχανής δεν εξαρτάται μόνο από το έργο ανά διαδρομή, αλλά επίσης και από τις διαδρομές στη μονάδα του χρόνου. Τέτοια όμως μηχανή είναι οικονομικά ασύμφορη στην κατασκευή της.

5) Οι τριβές που αναπόφευκτα υπάρχουν στις πραγματικές μηχανές έχουν ως αποτέλεσμα τη μη αναστρεψιμότητα των διεργασιών, οπότε υπάρχει απώλεια ενός μέρους του έργου που παράγεται.

Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι η μηχανή Carnot δεν μπορεί να κατασκευαστεί. Ανεξάρτητα όμως από αυτό, πολλά χρήσιμα συμπεράσματα έχουν προκύψει από τη μελέτη του κύκλου Carnot, τα οποία βοήθησαν στην κατασκευή και βελτίωση των σημερινών μηχανών που θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια.



**Εφαρμ. Θερμοδυναμική II**

# 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος (16α/26)

## Παράδειγμα 1

Μία άλλη σχηματική παράσταση του κύκλου Carnot είναι του σχήματος 7.7. Αποτελείται από ιδανικές (χωρίς τριβές) μονάδες, οι οποίες είναι ο αεροσυμπιεστής C, ο στρόβιλος T, ο θάλαμος καύσης B, το ψυγείο Ψ και η γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος G. Το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας που έχει στο σημείο 1 πίεση 4 bar και θερμοκρασία 540°C. Στο ψυγείο ο αέρας **εξέρχεται** με πίεση 1 bar και στον θάλαμο καύσης δίνουμε θερμότητα 310 kJ/kg. Ζητείται: α) Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου, β) το ποσό της θερμότητας που αφαιρείται στο ψυγείο και γ) η θερμοκρασία στο ψυγείο.

$$p_1 = 4 \text{ bar}, \theta_1 = 540^\circ \text{C}$$

$$p_4 = 1 \text{ bar}$$

$$Q_{12} = 310 \text{ kJ/kg}$$

## Λύση

Το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας, οπότε εφαρμόζουμε τις σχέσεις του τέλει αερίου. Από τον Πίνακα Γ6 έχουμε  $k = 1,4$ .

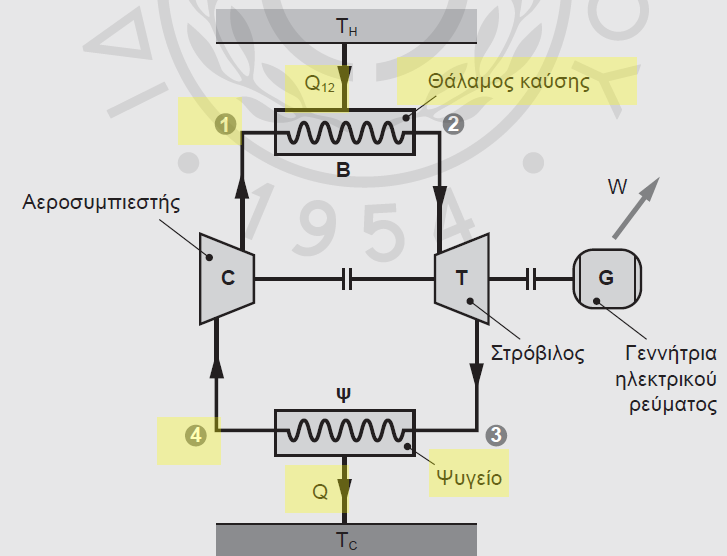
α) Από την εξίσωση (7.11), ο βαθμός απόδοσης είναι:

$$\eta_\theta = 1 - \left( \frac{p_4}{p_1} \right)^{(k-1)/k} = 1 - \left( \frac{1}{4} \right)^{0,286} = 0,327$$

β) οπότε από την εξίσωση (7.9) έχουμε ότι:

$$Q_{34} = (1 - \eta_\theta) Q_{12} = (1 - 0,327) \times 310 = 208 \text{ kJ/kg}$$

$$\gamma) \text{ και } T_C = (1 - \eta_\theta) T_H = (1 - 0,327) \times 813 = 547 \text{ K ή } 274^\circ \text{C}$$



Σχ. 7.7  
Σχηματική παράσταση μηχανής Carnot

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.**

*Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.*

ΑΕΡΙΟ	$M$ lbm/pmole	$c_p$ Btu/lbm-R	$c_p$ kJ/kg-K	$c_v$ Btu/lbm-R	$c_v$ kJ/kg-K	$k$	$R$ ft/lbf/lbm-R	$R$ kJ/kg-K
Άσετυλίνη ( $C_2H_2$ )	26.036	0.4048	1.6947	0.3285	1.3753	1.232	59.35	0.3195
Αέρας	28.97	0.24	1.0047	0.1714	0.7176	1.4	53.34	0.287
Αμμωνία ( $NH_3$ )	17.032	0.499	2.089	0.382	1.5992	1.304	90.73	0.4882
Αργόν (A)	39.95	0.1244	0.5208	0.0747	0.3127	1.666	38.68	0.2081
Διοξείδιο άνθρακα ( $CO_2$ )	44.01	0.2016	0.844	0.1565	0.6552	1.288	35.11	0.1889
Μονοξείδιο άνθρακα (CO)	28.01	0.2487	1.0412	0.1778	0.7444	1.399	55.17	0.2968
Χλώριο ( $Cl_2$ )	70.914	0.1144	0.4789	0.0864	0.3617	1.324	21.79	0.1172
Αιθάνιο ( $C_2H_6$ )	30.068	0.4186	1.7525	0.3526	1.4761	1.187	51.39	0.2765
Αιθυλένιο ( $C_2H_4$ )	28.052	0.3654	1.5297	0.2946	1.2333	1.24	55.09	0.2964
Ήλιο (He)	4.003	1.241	5.1954	0.745	3.1189	1.666	386.04	2.077
Υδρογόνο ( $H_2$ )	2.016	3.419	14.3136	2.434	10.190	1.4	766.54	4.125
Υδραζίνη ( $N_2H_4$ )	32.048	0.393	1.6453	0.33	1.3815	1.195	48.22	0.2594
Μεθάνιο ( $CH_4$ )	16.043	0.5099	2.1347	0.3861	1.6164	1.321	96.33	0.5183
Νέο (Ne)	20.183	0.246	1.0298	0.1476	0.6179	1.666	76.57	0.4120
Αζωτο ( $N_2$ )	28.016	0.2484	1.0399	0.1775	0.7431	1.399	55.16	0.2968
Όξυγόνο ( $O_2$ )	32	0.2194	0.9185	0.1573	0.6585	1.395	48.29	0.2598
Προπάνιο ( $C_3H_8$ )	44.094	0.3985	1.6683	0.3535	1.4799	1.127	35.05	0.1886
Διοξείδιο θείου ( $SO_2$ )	64.07	0.1487	0.6225	0.1177	0.4927	1.263	24.12	0.1298
Υδρατμός ( $H_2O$ )	18.016	0.4454	1.8646	0.3352	1.4033	1.329	85.77	0.4615
Ξένο (Xe)	131.3	0.0378	0.1582	0.0227	0.0950	1.666	11.77	0.0633



# 2ος Θερμοδυναμικός νόμος (17α/26)

## Παράδειγμα 2

Το εργαζόμενο μέσο σε μία **μηχανή Carnot** είναι **αέρας** μάζας 0,05 kg. Η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου είναι 940 K και η μέγιστη πίεση  $8,4 \times 10^3$  kPa. Η θερμότητα που **δίνεται** στον κύκλο είναι 4,2 kJ. Να προσδιοριστεί ο μέγιστος όγκος του κυλίνδρου, εάν η ελάχιστη θερμοκρασία στη διάρκεια του κύκλου είναι 300 K.

$$\begin{aligned} m &= 0.05 \text{ kg} \\ T_{\max} &= 940 \text{ K} = T_1 = T_2 \\ p_{\max} &= 8.4 \times 10^3 \text{ kPa} = p_1 \\ Q_{12} &= 4.2 \text{ kJ} \\ V_{\max} &= V_3 ? \\ T_{\min} &= 300 \text{ K} = T_3 = T_4 \end{aligned}$$

### Λύση

Από το σχήμα 7.5 βλέπουμε ότι η **μέγιστη θερμοκρασία και πίεση** παρατηρείται στην **κατάσταση 1** και ο **μέγιστος όγκος** στην **κατάσταση 3**. Για να βρούμε το  $V_3$ , θα πρέπει να ακολουθήσουμε τη διεργασία 1-2-3.

Εφόσον το εργαζόμενο μέσο είναι ο αέρας, εφαρμόζουμε τις εξισώσεις τέλειων αερίων. Έτσι από την εξίσωση (6.6) έχουμε ότι:

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{0,05 \times 0,287 \times 940}{8,4 \times 10^3} = 1,606 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Από την εξίσωση (7.7), λύνοντας ως προς  $V_2$  παίρνουμε:

$$Q_{12} = mRT_H \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \rightarrow \quad \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{Q_{12}}{p_1 V_1} = \frac{4,2}{8,4 \times 10^3 \times 1,606 \times 10^{-3}} = 0,311$$

$$V_2 = e^{0,311} V_1 = 1,365 \times 1,606 \times 10^{-3} = 2,192 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

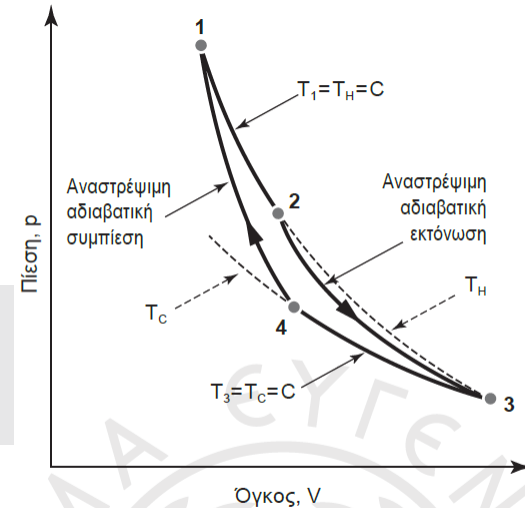
$$V_2 = 2,192 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad \text{και} \quad T_2 = T_1 = 940 \text{ K}$$

Για την αναστρέψιμη αδιαβατική εκτόνωση 2-3 από την εξίσωση (6.20) έχουμε ότι:

$$\frac{V_3}{V_2} = \left( \frac{T_2}{T_3} \right)^{1/(k-1)}$$

$$\text{και} \quad V_3 = 2,192 \times 10^{-3} \times \left( \frac{940}{300} \right)^{2,5} = 38,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Γ. Εξαμ. 2021-22



Σχ. 7.5

Το διάγραμμα p - V για τον κύκλο Carnot

**Μαθηματικά..**

Ισοδύναμο..  $\ln x = \ln_e x$

$$\ln_e \frac{\alpha}{\beta} = \gamma \Rightarrow \frac{\alpha}{\beta} = e^\gamma$$

# 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος (17β/26)

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.**

*Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.*

ΑΕΡΙΟ	$M$ lbm/pmole	$c_p$ Btu/lbm-R	$c_p$ kJ/kg-K	$c_v$ Btu/lbm-R	$c_v$ kJ/kg-K	$k$	$R$ ft·lbf/lbm-R	$R$ kJ/kg-K
Άσετυλίνη ( $C_2H_2$ )	26.036	0.4048	1.6947	0.3285	1.3753	1.232	59.35	0.3195
Αέρας	28.97	0.24	1.0047	0.1714	0.7176	1.4	53.34	0.287
Άμμωνία ( $NH_3$ )	17.032	0.499	2.089	0.382	1.5992	1.304	90.73	0.4882
Άργόν (A)	39.95	0.1244	0.5208	0.0747	0.3127	1.666	38.68	0.2081
Διοξείδιο άνθρακα ( $CO_2$ )	44.01	0.2016	0.844	0.1565	0.6552	1.288	35.11	0.1889
Μονοξείδιο άνθρακα (CO)	28.01	0.2487	1.0412	0.1778	0.7444	1.399	55.17	0.2968
Χλώριο ( $Cl_2$ )	70.914	0.1144	0.4789	0.0864	0.3617	1.324	21.79	0.1172
Αιθάνιο ( $C_2H_6$ )	30.068	0.4186	1.7525	0.3526	1.4761	1.187	51.39	0.2765
Αιθυλένιο ( $C_2H_4$ )	28.052	0.3654	1.5297	0.2946	1.2333	1.24	55.09	0.2964
Ήλιο (He)	4.003	1.241	5.1954	0.745	3.1189	1.666	386.04	2.077
Υδρογόνο ( $H_2$ )	2.016	3.419	14.3136	2.434	10.190	1.4	766.54	4.125
Υδραζίνη ( $N_2H_4$ )	32.048	0.393	1.6453	0.33	1.3815	1.195	48.22	0.2594
Μεθάνιο ( $CH_4$ )	16.043	0.5099	2.1347	0.3861	1.6164	1.321	96.33	0.5183
Νέο (Ne)	20.183	0.246	1.0298	0.1476	0.6179	1.666	76.57	0.4120
Άζωτο ( $N_2$ )	28.016	0.2484	1.0399	0.1775	0.7431	1.399	55.16	0.2968
Όξυγόνο ( $O_2$ )	32	0.2194	0.9185	0.1573	0.6585	1.395	48.29	0.2598
Προπάνιο ( $C_3H_8$ )	44.094	0.3985	1.6683	0.3535	1.4799	1.127	35.05	0.1886
Διοξείδιο θείου ( $SO_2$ )	64.07	0.1487	0.6225	0.1177	0.4927	1.263	24.12	0.1298
Υδρατμός ( $H_2O$ )	18.016	0.4454	1.8646	0.3352	1.4033	1.329	85.77	0.4615
Ξένο (Xe)	131.3	0.0378	0.1582	0.0227	0.0950	1.666	11.77	0.0633

# 2ος Θερμοδυναμικός νόμος (18α/26)

## Παράδειγμα 3

Το εργαζόμενο μέσο σε μία μηχανή Carnot είναι άζωτο. Η θερμότητα που δίνεται στη μηχανή είναι 53 kJ, ενώ ο λόγος αδιαβατικής εκτόνωσης  $V_3/V_2$  16:1. Η χαμηλή θερμοκρασία του κύκλου, όπου αφαιρείται ένα ποσό θερμότητας, είναι 22°C. Να προσδιοριστεί: α) Ο βαθμός απόδοσης, β) η θερμότητα που αφαιρείται και γ) το έργο που παράγεται από τη μηχανή.

### Λύση

$$Q_{12} = 53 \text{ kJ} = Q_H$$

$$\frac{V_3}{V_2} = 16$$

$$\theta_{\min} = 22^\circ\text{C} = 295\text{K} = T_{\min} = T_3 = T_4 = T_C$$

α) Από την εξίσωση (7.10) έχουμε ότι:

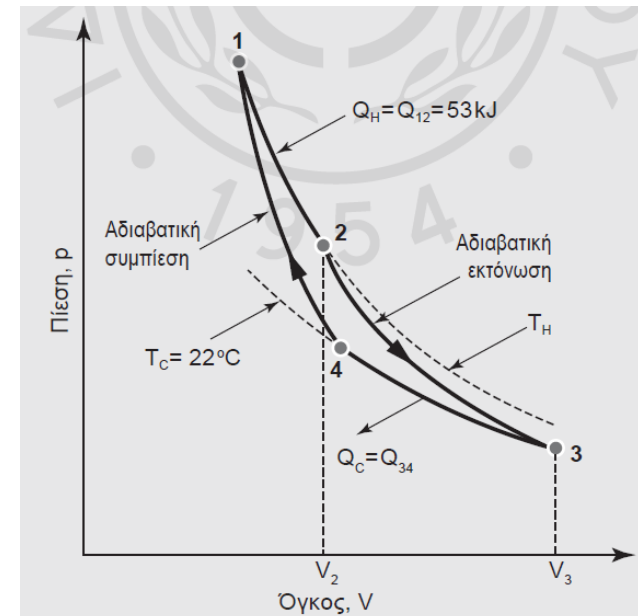
$$\eta_\theta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

2 → 3 (αδιαβατική):

$$\frac{V_3}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{1/k-1} \Rightarrow \frac{V_3}{V_2} = \left(\frac{T_H}{T_C}\right)^{1/k-1} \Rightarrow \frac{T_H}{T_C} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{k-1}$$

$$\Rightarrow \frac{T_H}{T_C} = (16)^{1,399-1} \Rightarrow \frac{T_H}{T_C} = 3,023 \Rightarrow \frac{T_C}{T_H} = 0,331$$

$$\eta_\theta = 1 - 0,331 = 0,669 < 1 \quad \text{ή} \quad \text{θερμικός βαθμός απόδοσης } 66,9\%$$



Σχ. 7.8

Διάγραμμα κύκλου μηχανής παραδείγματος 3



**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.**

*Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.*

ΑΕΡΙΟ	$M$ lbm/pmole	$c_p$ Btu/lbm-R	$c_p$ kJ/kg-K	$c_v$ Btu/lbm-R	$c_v$ kJ/kg-K	$k$	$R$ ft·lbf/lbm-R	$R$ kJ/kg-K
Άσετυλίνη ( $C_2H_2$ )	26.036	0.4048	1.6947	0.3285	1.3753	1.232	59.35	0.3195
Αέρας	28.97	0.24	1.0047	0.1714	0.7176	1.4	53.34	0.287
Αμμωνία ( $NH_3$ )	17.032	0.499	2.089	0.382	1.5992	1.304	90.73	0.4882
Αργόν (A)	39.95	0.1244	0.5208	0.0747	0.3127	1.666	38.68	0.2081
Διοξείδιο άνθρακα ( $CO_2$ )	44.01	0.2016	0.844	0.1565	0.6552	1.288	35.11	0.1889
Μονοξείδιο άνθρακα (CO)	28.01	0.2487	1.0412	0.1778	0.7444	1.399	55.17	0.2968
Χλώριο ( $Cl_2$ )	70.914	0.1144	0.4789	0.0864	0.3617	1.324	21.79	0.1172
Αιθάνιο ( $C_2H_6$ )	30.068	0.4186	1.7525	0.3526	1.4761	1.187	51.39	0.2765
Αιθυλένιο ( $C_2H_4$ )	28.052	0.3654	1.5297	0.2946	1.2333	1.24	55.09	0.2964
Ήλιο (He)	4.003	1.241	5.1954	0.745	3.1189	1.666	386.04	2.077
Υδρογόνο ( $H_2$ )	2.016	3.419	14.3136	2.434	10.190	1.4	766.54	4.125
Υδραζίνη ( $N_2H_4$ )	32.048	0.393	1.6453	0.33	1.3815	1.195	48.22	0.2594
Μεθάνιο ( $CH_4$ )	16.043	0.5099	2.1347	0.3861	1.6164	1.321	96.33	0.5183
Νέο (Ne)	20.183	0.246	1.0298	0.1476	0.6179	1.666	76.57	0.4120
Άζωτο ( $N_2$ )	28.016	0.2484	1.0399	0.1775	0.7431	1.399	55.16	0.2968
Όξυγόνο ( $O_2$ )	32	0.2194	0.9185	0.1573	0.6585	1.395	48.29	0.2598
Προπάνιο ( $C_3H_8$ )	44.094	0.3985	1.6683	0.3535	1.4799	1.127	35.05	0.1886
Διοξείδιο θείου ( $SO_2$ )	64.07	0.1487	0.6225	0.1177	0.4927	1.263	24.12	0.1298
Υδρατμός ( $H_2O$ )	18.016	0.4454	1.8646	0.3352	1.4033	1.329	85.77	0.4615
Ξένο (Xe)	131.3	0.0378	0.1582	0.0227	0.0950	1.666	11.77	0.0633

## Παράδειγμα 3

Το εργαζόμενο μέσο σε μία μηχανή Carnot είναι άζωτο. Η θερμότητα που δίνεται στη μηχανή είναι 53 kJ, ενώ ο λόγος αδιαβατικής εκτόνωσης  $V_3/V_2$  16:1. Η χαμηλή θερμοκρασία του κύκλου, όπου αφαιρείται ένα ποσό θερμότητας, είναι 22°C. Να προσδιοριστεί: α) Ο βαθμός απόδοσης, β) η θερμότητα που αφαιρείται και γ) το έργο που παράγεται από τη μηχανή.

$$Q_{12} = 53 \text{ kJ} = Q_H$$

$$\frac{V_3}{V_2} = 16$$

$$\theta_{\min} = 22^\circ\text{C} = 295\text{K} = T_{\min} = T_3 = T_4 = T_C$$

β) Από την εξίσωση (7.9),

$$n_\theta = \frac{Q_{12} - Q_{34}}{Q_{12}} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \Rightarrow Q_C = (1 - n_\theta)Q_H \Rightarrow$$

$$Q_{34} = Q_C = (1 - 0,669) \cdot 53 \cdot 10^3 \text{ (J)} = 17,5 \cdot 10^3 \text{ J} = 17,5 \text{ kJ}$$

γ) Το καθαρό έργο που παράγεται από τον κύκλο βρίσκεται από την εξίσωση (7.2):

$$W = \eta_\theta Q_{12} = 0,669 \times 53 = 35,46 \text{ kJ}$$

ή αλλιώς..

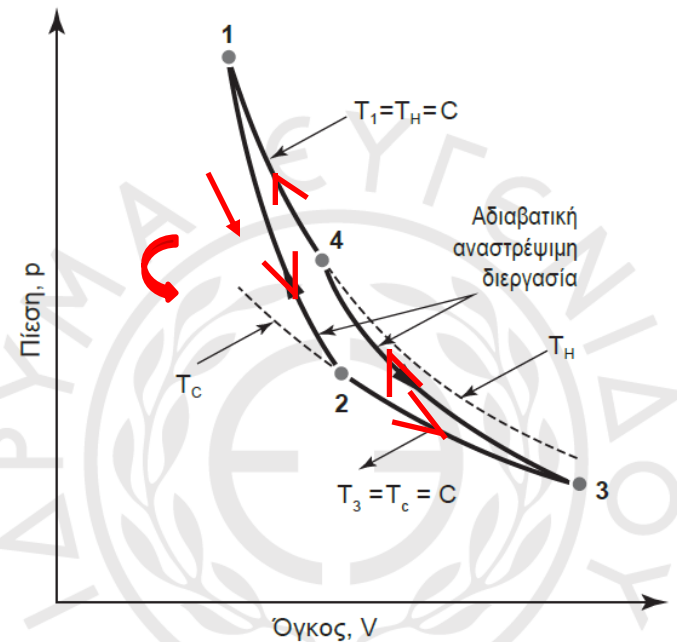
$$W = Q_H - Q_C = 53 - 17,54 = 35,46 \text{ kJ}$$

## Αντίστροφος κύκλος Carnot 3→4→1→2→3

Ο κύκλος αυτός αποτελείται από τις ίδιες διεργασίες που συναντήσαμε στον κύκλο Carnot, ο οποίος παράγει έργο (σχ. 7.5), με τη διαφορά ότι λειτουργεί με αντίστροφη φορά, όπως φαίνεται στο διάγραμμα p-V του σχήματος 7.9.

Η μηχανή που εργάζεται στον αντίστροφο κύκλο Carnot ονομάζεται **αναστρέψιμη μηχανή Carnot** και έχει ως σκοπό την αφαίρεση μιας ποσότητας θερμότητας σε χαμηλή θερμοκρασία προδίδοντας σ' αυτήν μηχανικό έργο.

## Συντελεστής Λειτουργίας



Σχ. 7.9

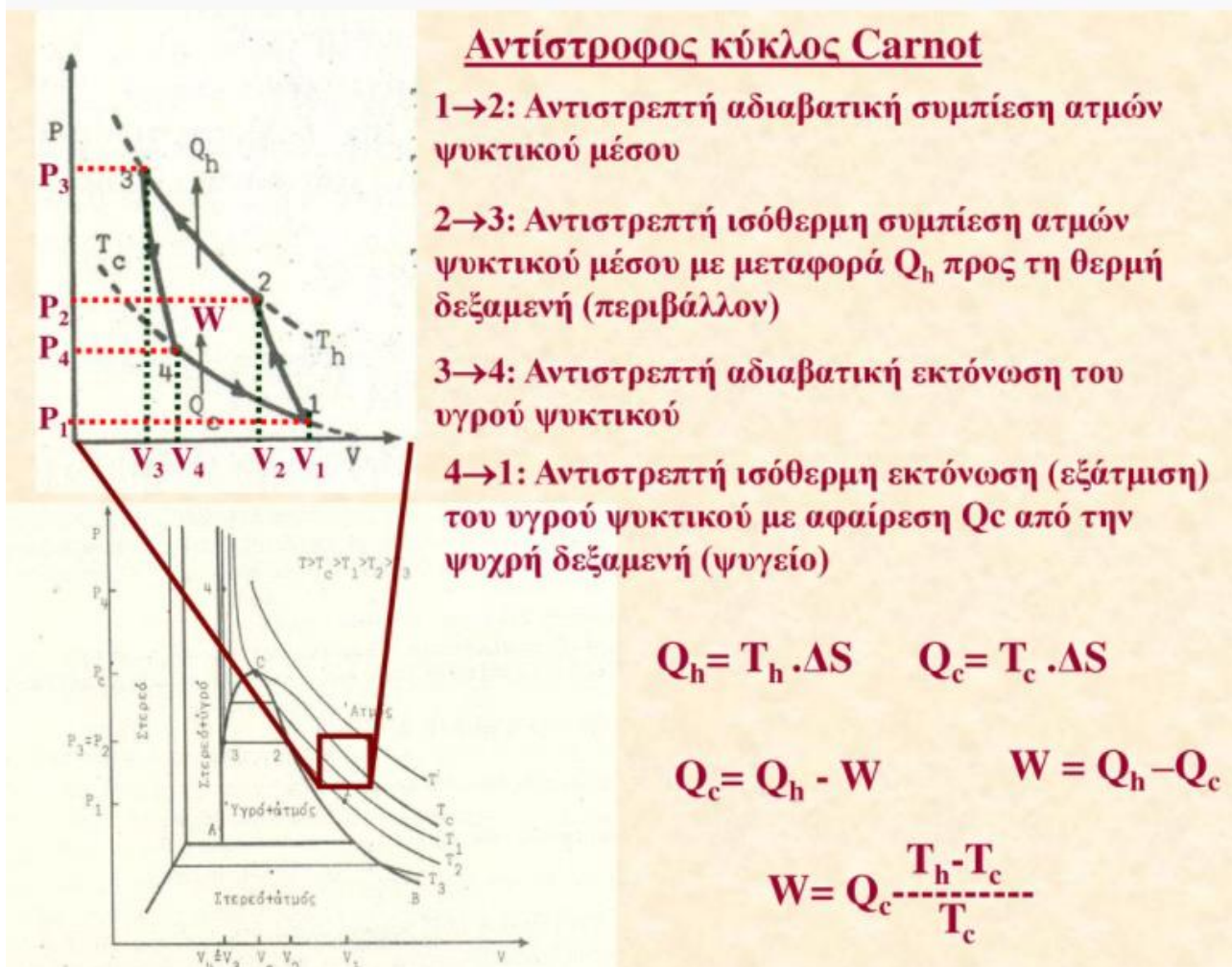
Διάγραμμα p-V αναστρέψιμου κύκλου Carnot

$$\sigma_\lambda = \frac{Q_{23}}{W} = \frac{p_3 V_3 \ln (V_2/V_3)}{p_1 V_1 \ln (V_2/V_3) - p_3 V_3 \ln (V_2/V_3)} \quad (7.12)$$

Μετά από ορισμένες απλοποιήσεις το  $\sigma_\lambda$  δίνεται ως:

$$\sigma_\lambda = \frac{T_3}{T_1 - T_3} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (7.13)$$

## Αντίστροφος κύκλος Carnot



Ενεργειακό ισοζύγιο :  $Q_c + W = Q_h$

$$W = Q_h - Q_c = Q_c [(T_h - T_c) / T_c]$$

**Συντελεστής απόδοσης ψυκτικής μηχανής** (θερμότητα που αφαιρείται προς το έργο που δαπανάται):

$$\varepsilon = Q_c / W = Q_c / (Q_h - Q_c) > 1$$

$$\varepsilon = Q_c / (Q_h - Q_c) = T_c \Delta S / (T_c \Delta S - T_h \Delta S_h) = T_c (S_2 - S_1) / [T_h (S_2 - S_1) - T_c (S_2 - S_1)]$$

$$\varepsilon = T_c / (T_h - T_c)$$

(απόδοση ψυγείων το καλοκαίρι μειωμένη επειδή  $T_h - T_c$  αυξημένη)



## 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος (21/26)

Στον ίδιο κύκλο λειτουργίας βασίζονται και οι μονάδες κλιματισμού που τελευταία τις ονομάζουμε και **αντλίες θερμότητας**, γιατί αντλούν θερμότητα για τη θέρμανση ή ψύξη χώρων ενδιαιτήσεων ή άλλων διαμερισμάτων των πλοίων. Ο συντελεστής λειτουργίας αυτών των μονάδων ορίζεται ως:

$$\sigma_{\lambda\alpha} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (7.14)$$

γιατί εδώ μάς ενδιαφέρει η μεταφορά της θερμότητας στην υψηλή θερμοκρασία  $T_H$ , και όχι από τη χαμηλή θερμοκρασία  $T_C$ , όπως συμβαίνει στις ψυκτικές εγκαταστάσεις. Περισσότερες όμως λεπτομέρειες και τιμές των συντελεστών λειτουργίας θα

## Παράδειγμα 1

Μία αναστρέψιμη μηχανή Carnot αφαιρεί από μία θερμή πηγή 40 kW. Η θερμοκρασία της θερμής πηγής είναι 320 K. Η θερμότητα που αφαιρείται από τη θερμή πηγή αποβάλλεται σε θερμοκρασία 260 K. Να προσδιοριστεί η ισχύς της μηχανής που απαιτείται για την αφαίρεση της θερμότητας αυτής.

## Λύση

Από την εξίσωση (7.13) έχουμε ότι ο συντελεστής λειτουργίας είναι:

$$\sigma_{\lambda} = \frac{T_C}{T_H - T_C} = \frac{260}{320 - 260} = 4,33$$

οπότε η ισχύς της μηχανής είναι:

$$\dot{W} = \frac{\dot{Q}_{23}}{\sigma_{\lambda}} = \frac{40}{4,33} = 9,23 \text{ kW}$$

### Παράδειγμα 2

Για τη θέρμανση ενός σπιτιού τους χειμερινούς μήνες χρησιμοποιείται μία αντλία θερμότητας. Όταν η μέση εξωτερική θερμοκρασία είναι 0°C και η εσωτερική του σπιτιού 23°C, η απώλεια της θερμότητας από το σπίτι είναι 20 kW. Να προσδιοριστεί η ελάχιστη ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία της αντλίας.

$$\theta_C = 0^\circ\text{C} = 273\text{K} = T_C$$
$$\theta_H = 23^\circ\text{C} = 296\text{K} = T_H$$

### Λύση

Για μία αντλία θερμότητας ο συντελεστής είναι, εξίσωση (7.14):

$$\sigma_{\lambda\alpha} = \frac{T_H}{T_H - T_C} = \frac{296}{296 - 273} = 12,87$$

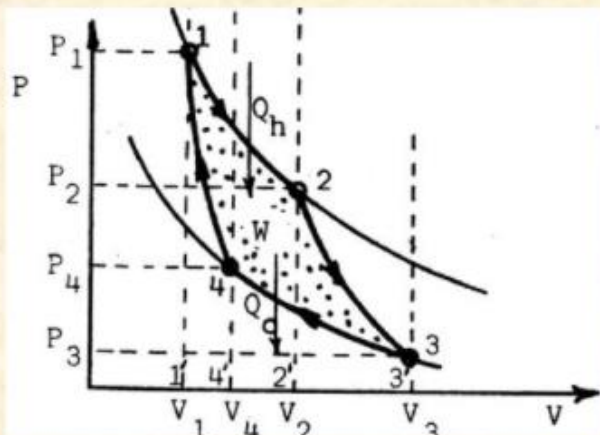
Άρα:

$$\dot{W} = \frac{20}{12,87} = 1,55 \text{ kW}$$

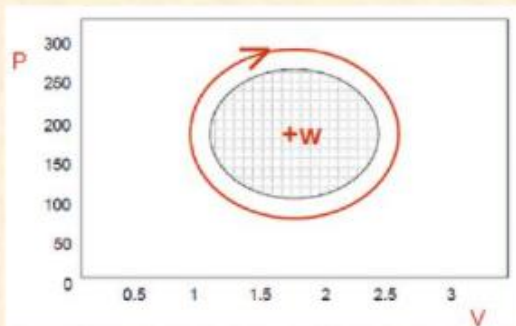
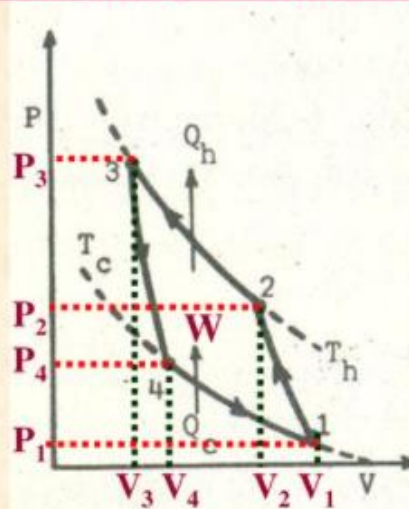


# 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος (24/26)

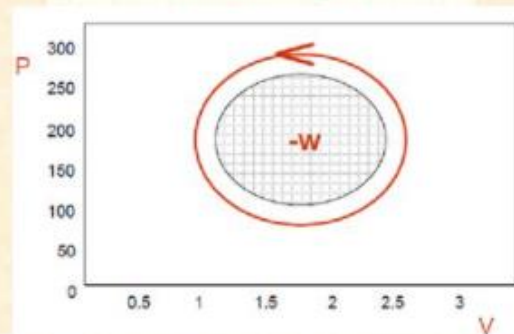
## Κύκλος Carnot



## Αντίστροφος κύκλος Carnot



**ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΝΕΙ  
ΕΡΓΟ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**



**ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΙΡΝΕΙ ΕΡΓΟ  
ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

## Χαρακτηριστικά Θερμοδυναμικών Νόμων

### 1<sup>ος</sup> Νόμος

- Εισάγει την  $U$
- Αρχή διατήρησης ενέργειας
- Συνδέει ποσότητες ( $Q, W$ ) με ιδιότητες ( $U, H$ )

### 2<sup>ος</sup> Νόμος

- Εισάγει την  $S$
- Αρχή αύξησης της εντροπίας (αταξίας) του σύμπαντος
- Μελετά την εφικτότητα των διεργασιών
- Εισάγει την ποιότητα της ενέργειας.

### 3<sup>ος</sup> Νόμος

$S = 0$  σε  $T = 0 \text{ K}$   
(τέλειος κρύσταλλος)

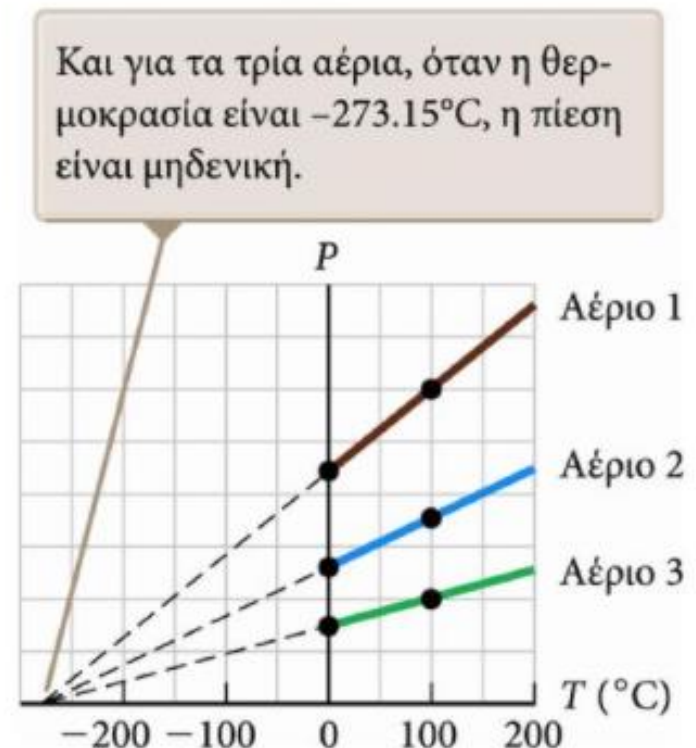
## Απόλυτο μηδέν

Οι ενδείξεις των θερμομέτρων είναι σχεδόν ανεξάρτητες από το αέριο που χρησιμοποιείται.

Αν προεκτείνουμε τις ευθείες για τα διάφορα αέρια, θα διαπιστώσουμε ότι η πίεση είναι πάντα μηδενική όταν η θερμοκρασία είναι ίση με  $-273.15^{\circ}\text{C}$ .

Η συγκεκριμένη θερμοκρασία ονομάζεται **απόλυτο μηδέν**.

Το απόλυτο μηδέν είναι η βάση της κλίμακας απόλυτης θερμοκρασίας (συμβολίζεται:  $T$ ).



## Μερικά παραδείγματα απόλυτων θερμοκρασιών

Στην εικόνα δεξιά μπορείτε να δείτε την απόλυτη θερμοκρασία διαφόρων φυσικών διεργασιών.

Η κλίμακα είναι λογαριθμική.

Η θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός δεν μπορεί να επιτευχθεί.

- Έχει προσεγγιστεί κατά τη διάρκεια πειραμάτων.

Σημειώστε ότι η κλίμακα είναι λογαριθμική.

Θερμοκρασία (K)

