ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

⚠ΙΑΒΑΣΕ ΑΥΤΟ, ΠΡΙΝ ΞΕΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ

Σε ροζ φόντο ☞ ΔΙΔΑΚΤΕΑ ΥΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (2014-2015)

- Μαύρα γράμματα ☞ θεωρία
- *Μπλε πλάγια γράμματα* ☞ **παραδείγματα κι αποτελέσματα πειραμάτων**

Σε μαύρο φόντο ☞ ΘΕΜΑΤΑ ΕΚΤΟΣ ΔΙΔΑΚΤΕΑΣ ΥΛΗΣ (2014-2015)

- Υπενθύμιση γνώσεων **Φυσικής ή Μαθηματικών**
- **Παρατηρήσεις – αποδείξεις**, που μπορεί να συμπληρώσουν τη διδασκαλία ή τη μελέτη
- **Εξισώσεις, που προκύπτουν συνδυαστικά** και δεν αναφέρονται στο σχολικό βιβλίο, αλλά χρειάζονται στη λύση ασκήσεων

Όπου υπάρχει αυτό το εικονίδιο κάνε κλικ για να δεις σχετική βιντεο-προσομοίωση ενός φαινομένου.

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ - ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

Δύο διαδικασίες με τις οποίες τα σώματα ανταλλάσσουν ενέργεια

Στην προηγούμενη τάξη αναφερθήκαμε σε ανταλλαγές ενέργειας που γίνονται με "εκτέλεση έργου".

Τον κλάδο τής Φυσικής που εξετάζει μόνο όσες ανταλλαγές ενέργειας γίνονται με εκτέλεση έργου τον λέμε **Μηχανική**.

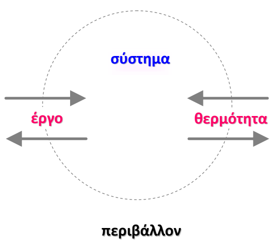
Θυμίζουμε ότι εκτέλεση έργου λέμε τη διαδικασία, με την οποία προσφέρεται ή αφαιρείται (κινητική) ενέργεια σε ένα σώμα, όταν –αντίστοιχα– αυτό δέχεται δύναμη στην ίδια κατεύθυνση ή αντίθετα με μια μετατόπισή του.
Επίσης, με το έργο μιας δύναμης μπορεί μια μορφή ενέργειας (π.χ. δυναμική) να μετατραπεί σε μια άλλη μορφή (π.χ. κινητική).

Στην συνέχεια θα διευρύνουμε τη μελέτη των ενεργειακών ανταλλαγών. Χωρίς να ξεχνάμε την εκτέλεση έργου, θα εξετάσουμε και μια άλλη διαδικασία, με την οποία τα σώματα ανταλλάσσουν ενέργεια: τη **ροή θερμότητας**.

Τον κλάδο τής Φυσικής που εξετάζει τις ενεργειακές ανταλλαγές που πραγματοποιούνται (και) με ροή θερμότητας τον λέμε **Θερμοδυναμική**.

Θυμίζουμε πως θερμότητα λέμε την ενέργεια που ρέει είτε από περιοχή σε περιοχή τού ίδιου σώματος είτε από σώμα σε σώμα, με χαμηλότερη θερμοκρασία –δηλαδή, από εκεί όπου οι ταχύτητες των μορίων είναι (κατά μέσο όρο) μεγαλύτερες προς εκεί όπου είναι μικρότερες.

Συχνά μας ενδιαφέρει το "πάρε–δώσε" τής ενέργειας που συμβαίνει όταν ένα συγκεκριμένο σύνολο σωμάτων ή σωματιδίων αλληλεπιδρά με άλλα σώματα ή σωματίδια.



Ενεργειακές ανταλλαγές συστήματος–περιβάλλοντος, έτσι όπως τις μελετάμε στη Θερμοδυναμική

Ένα σύνολο των σωμάτων ή σωματιδίων, που αποτελεί επίκεντρο τού ενδιαφέροντός μας, το οριοθετούμε με πραγματικά ή νοητά όρια –ώστε να ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα σώματα στο σύμπαν– και το λέμε **σύστημα**.
Το υπόλοιπο σύμπαν αποτελεί το **περιβάλλον** τού συστήματος.

Σύστημα μπορεί να θεωρήσουμε, π.χ., ένα άτομο τής ύλης, τα μόρια ενός αερίου μέσα σε δοχείο, δύο μπάλες τού μπιλιάρδου που συγκρούονται, ένα αυτοκίνητο στο δρόμο, τους πλανήτες που περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο ("το ηλιακό μας σύστημα", όπως λέμε) ή ακόμα και το σύνολο των μυών τού σώματός μας ("το μυικό μας σύστημα").

Όταν ένα σύστημα αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του, ανταλλάσσουν ενέργεια.
Αν εξετάζουμε μόνο όσες ανταλλαγές ενέργειας γίνονται με εκτέλεση έργου, χαρακτηρίζουμε το σύστημα **μηχανικό**, ενώ όταν εξετάζουμε και τις ανταλλαγές ενέργειας που γίνονται με ροή θερμότητας, χαρακτηρίζουμε το σύστημα **θερμοδυναμικό**.

☞ Στη συνέχεια θα μελετήσουμε θερμοδυναμικά συστήματα, έχοντας πάντα στο μυαλό μας –ως παράδειγμα– το σύστημα ενός ιδανικού αερίου, περιορισμένου μέσα σε δοχείο, στο οποίο δε συμβαίνουν χημικές αντιδράσεις.
Τα τοιχώματα τού δοχείου μπορεί να είναι είτε **διαθερμικά** (όταν επιτρέπουν την ανταλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο αέριο και το περιβάλλον) είτε από **θερμικά μονωτικό** υλικό (όταν απαγορεύουν μια τέτοια ανταλλαγή).

Για να περιγράψουμε την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ένα θερμοδυναμικό σύστημα, χρησιμοποιούμε –κατάλληλα για κάθε σύστημα– μεγέθη, που λέμε ότι είναι οι (**θερμοδυναμικές**) **μεταβλητές** του.

Ειδικότερα, η κατάσταση τού συστήματος ενός αερίου ορισμένης μάζας αντιπροσωπεύεται (όπως ήδη έχουμε πει) από τρία μεγέθη του: την πίεση, τη θερμοκρασία και τον όγκο του.

Αν παρέλθει αρκετός χρόνος και ένα σύστημα δεν αλληλεπιδράσει με το περιβάλλον του (ανταλλάσσοντας ενέργεια με ροή θερμότητας ή/και εκτέλεση έργου), τότε κάθε μεταβλητή του αποκτά ενιαία τιμή σε όλες τις περιοχές τού συστήματος και από κει και ύστερα παραμένει σταθερή, για όσο αυτό συνεχίζει να μην αλληλεπιδρά.
Κατά τη διάρκεια τής σταθεροποίησης όλων των μεταβλητών του θεωρούμε ότι το σύστημα δε μεταβάλλεται.
Μια τέτοια –στατική– κατάσταση για το σύστημα θα τη λέμε **κατάσταση** (**θερμοδυναμικής**) **ισορροπίας**.
(Για συντομία, θα γράφουμε Κ.Ι.)

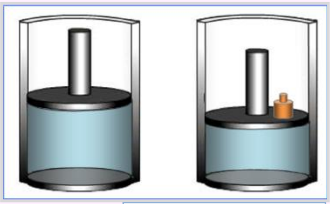
Ειδικότερα, για μια ποσότητα αερίου λέμε ότι βρίσκεται σε Κ.Ι., όταν καθένα από τα μεγέθη πίεση, πυκνότητα και θερμοκρασία έχει ενιαία και σταθερή τιμή σε κάθε περιοχή τού αερίου.
Αν αέριο και περιβάλλον αλληλεπιδράσουν, τότε συμμεταβάλλονται.
Μόλις σταματήσει η αλληλεπίδραση, το αέριο καταλήγει πάλι σε μια –νέα– Κ.Ι., όπου μία, τουλάχιστον, από τις μεταβλητές του έχει διαφορετική τιμή από την προηγούμενη Κ.Ι.

Για να παρακολουθήσουμε παραστατικά τις μεταβολές ενός αερίου, χρησιμοποιούμε δύο κάθετους άξονες, τους οποίους βαθμολογούμε με τις τιμές δύο μεταβλητών.
Τότε, κάθε Κ.Ι. τού αερίου την αντιστοιχίζουμε σε ένα σημείο, οι συντεταγμένες τού οποίου είναι οι τιμές των μεταβλητών στη συγκεκριμένη κατάσταση.

Προφανώς, στα διαγράμματα p–V, V–T, p–T στους νόμους των αερίων (που γνωρίσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο) οι γραφικές παραστάσεις αποτελούνται από σημεία, που αντιπροσωπεύουν διαδοχικές Κ.Ι. ενός αερίου.
Αν το αέριο δε βρίσκεται σε Κ.Ι., η πίεση και η θερμοκρασία δεν έχουν ενιαία τιμή σε όλες τις περιοχές του, οπότε δε μπορούμε να μιλάμε για "πίεση ή θερμοκρασία τού αερίου". Επομένως, μια τέτοια κατάσταση δε γίνεται να την αντιστοιχίσουμε σε ένα σημείο, σε κάποιο διάγραμμα μεταβλητών.

ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

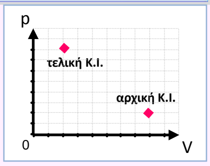
Όταν ένα σύστημα μεταβάλλεται από μια αρχική σε μια τελική Κ.Ι., τότε διέρχεται διαδοχικά από ενδιάμεσες καταστάσεις, οι οποίες είτε είναι κι αυτές Κ.Ι. είτε είναι εξαιρετικά πολύπλοκες καταστάσεις
(που είναι αδύνατο να τις περιγράψουμε, διότι κάθε μεταβλητή τού συστήματος έχει ποικίλες τιμές στις διάφορες περιοχές του).



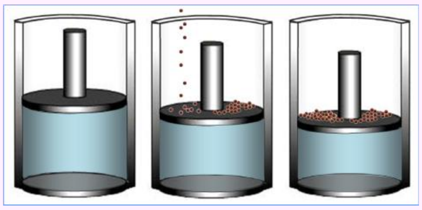
Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε το σύστημα μιας ποσότητας αερίου μέσα σε ένα κατακόρυφο δοχείο, το επάνω μέρος τού οποίου κλείνεται με εφαρμοστό έμβολο, που μπορεί να κινείται με αμελητέες τριβές.
(Παραλλαγή τέτοιου συστήματος χρησιμοποιούν οι μηχανές εσωτερικής καύσης, οι ατμομηχανές και οι συμπιεστές στα ψυγεία και στα κλιματιστικά μηχανήματα.)

- *Το έμβολο, αρχικά, ισορροπεί και το αέριο βρίσκεται σε Κ.Ι.*

Αν τοποθετήσουμε ένα βαρίδι πάνω στο έμβολο, αυτό θα υποχωρήσει απότομα και θα ισορροπήσει σε μια νέα θέση. Το αέριο, αφού διέλθει από ενδιάμεσες, πολύπλοκες, καταστάσεις, θα καταλήξει σε μια νέα Κ.Ι.

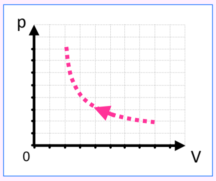


Αν βαθμολογήσουμε δύο κάθετους άξονες με τις τιμές δύο μεταβλητών τού αερίου, μπορούμε να αντιστοιχίσουμε σε δύο σημεία μόνο την αρχική και την τελική κατάσταση τού αερίου, οι οποίες είναι Κ.Ι.



- *Ένας άλλος τρόπος να πραγματοποιήσουμε την ίδια μεταβολή στο αέριο είναι να μετακινήσουμε το έμβολο με πάρα πολύ αργό ρυθμό.*

Αν διαθέτουμε ποσότητα άμμου, που έχει την ίδια μάζα με το βαρίδι που χρησιμοποιήσαμε, μπορούμε να ρίξουμε, αρχικά, έναν κόκκο άμμου πάνω στο έμβολο. Το αέριο, τότε, θα υποστεί μια απειροελάχιστη μείωση στον όγκο του και, μετά από κάποιο χρόνο, θα ισορροπήσει και πάλι.
(Το πότε αποκαθίσταται η ισορροπία μπορεί να ελεγχθεί πειραματικά).
Αν επαναλάβουμε την ίδια ενέργεια, μέχρι να εξαντληθεί η ποσότητα τής άμμου, ρίχνοντας έναν κόκκο κάθε φορά πάνω στο έμβολο, το αέριο θα διέλθει από διαδοχικές Κ.Ι. και θα καταλήξει στην ίδια τελική Κ.Ι., στην οποία είχε οδηγηθεί και με την προηγούμενη διαδικασία (τής απότομης μεταβολής που προκάλεσε η τοποθέτηση τού βαριδιού).



Αν βαθμολογήσουμε δύο κάθετους άξονες με τις τιμές δύο μεταβλητών τού αερίου, μπορούμε να αντιστοιχίσουμε σε σημεία όλες τις Κ.Ι. που περνά το αέριο (κάθε Κ.Ι. και ένα σημείο).
Καθώς η μια κατάσταση διαδέχεται την άλλη, τα σημεία θα βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια συνεχής γραμμή, από την αρχική μέχρι την τελική κατάσταση.
Είναι προφανές ότι, με αντίστροφους χειρισμούς (αφαιρώντας, δηλαδή, από το έμβολο ένα κόκκο άμμου κάθε φορά), μπορούμε να επαναφέρουμε το αέριο από την τελική στην αρχική κατάσταση, περνώντας το διαδοχικά από τις ίδιες ενδιάμεσες καταστάσεις, αλλά με αντίστροφη σειρά.

Μια μεταβολή ενός συστήματος, κατά την οποία αυτό μεταβαίνει από μια αρχική σε μια τελική Κ.Ι., περνώντας από διαδοχικές ενδιάμεσες Κ.Ι., είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί και αντίστροφα, γι΄ αυτό την χαρακτηρίζουμε **αντιστρεπτή**.
Μπορούμε να βαθμολογήσουμε δύο κάθετους άξονες με τις τιμές δύο μεταβλητών τού συστήματος και να αντιστοιχίσουμε τις διαδοχικές Κ.Ι. του σε σημεία πολύ κοντινά –οπότε προκύπτει μια συνεχής γραμμή.
Στις μη αντιστρεπτές μεταβολές αντιστοιχίζουμε σε σημεία μόνο την αρχική και την τελική κατάσταση τού συστήματος (αν είναι Κ.Ι.).

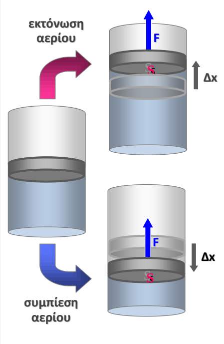
Στο πείραμα που περιγράψαμε, θα μπορούσαμε –πράγματι– να υλοποιήσουμε την αντίστροφη πορεία στη μεταβολή τού αερίου, με τον τρόπο που εξηγήσαμε.
Η αντίστροφη εξέλιξη ενός φαινομένου είναι αυτό που θα βλέπαμε, εάν το κινηματογραφούσαμε και παίζαμε την ταινία ανάποδα (προς τα πίσω). Όμως στη φύση, η αντίστροφη πορεία ενός κεριού που καίγεται θα ήταν ένα κερί που μεγαλώνει σε μήκος. Η αντίστροφη πορεία ενός φυτού που αναπτύσσεται θα ήταν ένα φυτό που μικραίνει και ξαναγίνεται σπόρος.
Η αντίστροφη πορεία τής θέρμανσης των ελαστικών τού αυτοκινήτου, της ασφάλτου και του αέρα, η οποία ακολουθεί ένα φρενάρισμα, θα ήταν όλα αυτά να ξαναψυχθούν και η συνολική κινητική ενέργεια των μορίων τους, την οποία απέκτησαν με το φρενάρισμα, να συγκεντρωθεί και να ξαναγίνει κινητική ενέργεια τού αυτοκινήτου.
Τέτοια σενάρια, όμως, μόνο στην επιστημονική φαντασία θα μπορούσαν να χωρέσουν, καθώς η επιστημονική πραγματικότητα –που, στην περίπτωση αυτή, συμφωνεί και με την κοινή λογική– λέει ότι αντίστροφη εξέλιξη φαινομένων (σαν κι αυτή που περιγράψαμε) ουδέποτε έχει παρατηρηθεί στη φύση.

Οι μεταβολές στη φύση είναι **μη αντιστρεπτές**.

☞ Στη συνέχεια, θα ασχοληθούμε με μεταβολές αερίων (που συμπεριφέρονται ως ιδανικά), οι οποίες θα εννοούμε ότι πραγματοποιούνται αρκετά αργά, ώστε να μπορούν να θεωρηθούν αντιστρεπτές.

ΕΡΓΟ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΓΚΟΥ ΕΝΟΣ ΑΕΡΙΟΥ

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε τι συνέπειες έχει μια αντιστρεπτή μεταβολή όγκου ενός (ιδανικού) αερίου, τόσο για το ίδιο το αέριο όσο και για το περιβάλλον του.



Θεωρούμε το σύστημα ενός αερίου, που περιέχεται σε δοχείο, το οποίο κλείνεται με ένα εφαρμοστό έμβολο.

- Όταν το έμβολο απομακρύνεται από τη βάση τού δοχείου, ο όγκος τού αερίου αυξάνεται και λέμε ότι το αέριο **εκτονώνεται**.
- Όταν το έμβολο πλησιάζει τη βάση τού δοχείου, ο όγκος τού αερίου μειώνεται και λέμε ότι το αέριο **συμπιέζεται**.

Σε κάθε περίπτωση, η μεταβολή τού όγκου τού αερίου είναι $\Delta V = \pm S\,\Delta x$, όπου S είναι το εμβαδόν τής βάσης τού εμβόλου και Δx το μέτρο τής μετατόπισής του. Αν $\Delta V > 0$ έχουμε εκτόνωση και αν $\Delta V < 0$ έχουμε συμπίεση τού αερίου.

Η μεταβολή όγκου μπορεί είτε να συνοδεύεται από μεταβολή τής πίεσης τού αερίου είτε όχι.

Εξετάζουμε πρώτα την περίπτωση που το αέριο διατηρεί σταθερή πίεση (ισοβαρής μεταβολή).
Η σταθερή πίεση p τού αερίου ασκείται και στο έμβολο, οπότε το αέριο ασκεί στο έμβολο μια σταθερή δύναμη, με μέτρο

$$F = p\,S$$

Όταν το αέριο εκτονώνεται, η δύναμη αυτή ασκείται στο έμβολο στην ίδια κατεύθυνση με τη μετατόπισή του, οπότε εκτελεί θετικό έργο.
Όταν το αέριο συμπιέζεται, η δύναμη ασκείται αντίθετα στη μετατόπιση τού εμβόλου και εκτελεί αρνητικό έργο.
Σε κάθε περίπτωση, δηλαδή, το έργο είναι:

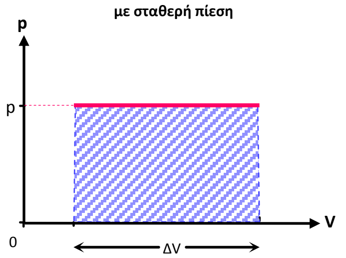
$$\begin{aligned} W_p &= \pm F\,\Delta x \qquad \text{[ο δείκτης p σημαίνει σταθερή πίεση]} \\ &= \pm p\,S\,\Delta x \\ &= p\,(\pm S\,\Delta x) \end{aligned}$$

Άρα, σε μια ισοβαρή μεταβολή αερίου το έργο που εκτελείται από το αέριο πάνω στο έμβολο είναι

$$\begin{aligned} \mathbf{W_p} &= \mathbf{p\,\Delta V} \\ &= p\,(V_{τελ} - V_{αρχ}) \\ &= p\,V_{τελ} - p\,V_{αρχ} \\ &= n\,R\,T_{τελ} - n\,R\,T_{αρχ} \qquad \text{[λόγω τής καταστατικής εξίσωσης]} \end{aligned}$$

$$\text{ή} \quad \mathbf{W_p = n\,R\,\Delta T}$$

Διάγραμμα p–V αντιστρεπτής μεταβολής αερίου με σταθερή πίεση

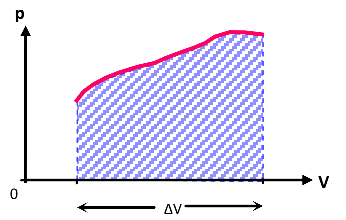


Κατασκευάζουμε το διάγραμμα p–V τού αερίου, ως εξής:
Βαθμολογούμε δύο κάθετους άξονες με τις τιμές τού όγκου και την τιμή τής πίεσης.
Το αέριο διέρχεται από διαδοχικές Κ.Ι., που τις αντιστοιχίζουμε σε σημεία, τα οποία βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο.
Αν ενώσουμε τα σημεία, προκύπτει μια γραφική παράσταση, που είναι ευθεία παράλληλη στον άξονα V.
Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι:

Όταν ο όγκος ενός αερίου μεταβάλλεται κατά ΔV, με σταθερή πίεση, τότε ανάμεσα στον άξονα V του διαγράμματος p–V και στη γραφική παράσταση τής μεταβολής ορίζεται ένα εμβαδόν *(το γραμμοσκιασμένο παραλληλόγραμμο ///).*
Το εμβαδόν αυτό είναι p |ΔV|, άρα είναι ίσο με την απόλυτη τιμή τού έργου που εκτελείται από το αέριο πάνω στο έμβολο, κατά τη μεταβολή ΔV τού όγκου.

Εξετάζουμε τώρα την περίπτωση όπου η μεταβολή όγκου τού αερίου συνοδεύεται και από μεταβολή τής πίεσής του.

Διάγραμμα p–V αντιστρεπτής μεταβολής αερίου με μεταβαλλόμενη πίεση



Τότε, κατά τη μετατόπισή του το έμβολο δέχεται από το αέριο μια δύναμη, με μεταβαλλόμενο μέτρο

$$F = p\,S$$

Το θετικό έργο τής εκτόνωσης και το αρνητικό έργο τής συμπίεσης δε μπορούν να λογαριαστούν με την εξίσωση $W = p\,\Delta V$ (που ισχύει για σταθερή πίεση τού αερίου). Καταφεύγουμε, τότε, στο διάγραμμα p–V.

Όταν ο όγκος ενός αερίου μεταβάλλεται κατά ΔV, με ταυτόχρονη μεταβολή και της πίεσής του, τότε ανάμεσα στον άξονα V του διαγράμματος p–V και στη γραφική παράσταση τής μεταβολής ορίζεται ένα εμβαδόν (το γραμμοσκιασμένο ///).
Το εμβαδόν αυτό είναι ίσο με την απόλυτη τιμή τού έργου που εκτελείται από το αέριο πάνω στο έμβολο, κατά τη μεταβολή ΔV τού όγκου.

Δηλαδή, ανεξάρτητα από το εάν η πίεση τού αερίου μεταβάλλεται ή όχι, μπορούμε να γράφουμε ότι:

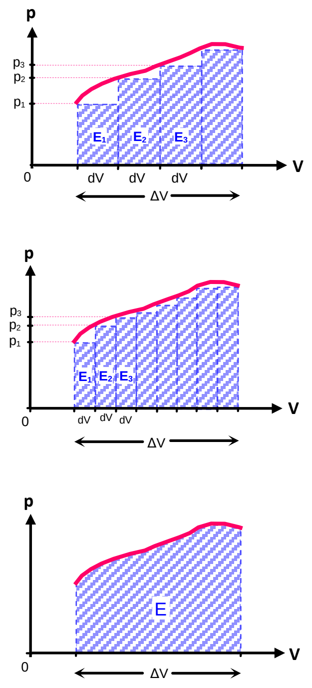
έργο εκτόνωσης ή συμπίεσης αερίου = ± (εμβαδόν στο διάγραμμα p–V)

Όμως, στην περίπτωση που η πίεση τού αερίου μεταβάλλεται, το προηγούμενο συμπέρασμα δεν είναι τόσο προφανές.
Ας δούμε, με απλούς συλλογισμούς, γιατί έχουμε το δικαίωμα να το ισχυριζόμαστε.

Στη Μηχανική μάθαμε ότι, αν μια δύναμη έχει σταθερή κατεύθυνση αλλά μεταβαλλόμενο μέτρο, το έργο της λογαριάζεται μόνο από το διάγραμμα δύναμης–μετατόπισης (F–Δx).
Στη γλώσσα τής Θερμοδυναμικής, είδαμε ότι :

- η μεταβαλλόμενη δύναμη F από το αέριο στο έμβολο αντιστοιχεί σε μεταβαλλόμενη πίεση p πάνω στο έμβολο και
- η μετατόπιση Δx τού εμβόλου αντιστοιχεί σε μεταβολή ΔV τού όγκου τού αερίου

Διάγραμμα p–V αντιστρεπτής μεταβολής αερίου με μεταβαλλόμενη πίεση



Έτσι, για να λογαριάσουμε το έργο τής μεταβαλλόμενης δύναμης τού αερίου πάνω στο έμβολο, καταφεύγουμε στο διάγραμμα p–V (αντί για το διάγραμμα F–Δx).
Χωρίζουμε τη μεταβολή ΔV τού όγκου τού αερίου σε πολλές μικρές μεταβολές dV.
Κατά τη διάρκεια κάθε τέτοιας μεταβολής η πίεση, πιθανόν, αλλάζει.

Αν δεχτούμε ότι, κατά τη διάρκεια τής πρώτης μεταβολής dV η πίεση δε μεταβάλλεται σημαντικά και διατηρεί την τιμή p_1 που έχει στην αρχή τής μεταβολής, τότε σ΄ αυτή τη μεταβολή όγκου το έργο που εκτελείται από το αέριο πάνω στο έμβολο είναι $dW_1 = p_1\, dV$ –όσο είναι και το εμβαδόν τού παραλληλογράμμου E_1.

Για την επόμενη μεταβολή όγκου dV κάνουμε μια ίδια προσέγγιση: δεχόμαστε ότι η πίεση ξεκινά με τιμή p_2, την οποία διατηρεί μέχρι το τέλος τής μεταβολής dV. Έτσι, το έργο που εκτελείται είναι $dW_2 = p_2\, dV$ –όσο είναι το εμβαδόν τού παραλληλογράμμου E_2.

Με την ίδια λογική γράφουμε το έργο που εκτελείται για κάθε μικρή μεταβολή dV του όγκου.

Αν προσθέσουμε τα επί μέρους έργα, θα έχουμε το έργο που εκτελείται από το αέριο πάνω στο έμβολο, κατά τη συνολική μεταβολή ΔV τού όγκου του:

$$W = dW_1 + dW_2 + dW_3 + \ldots = E_1 + E_2 + E_3 + \ldots$$

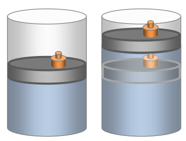
Πρόκειται, ασφαλώς, για έναν προσεγγιστικό υπολογισμό τού έργου, διότι, κατά τη διάρκεια κάθε μικρής μεταβολής όγκου θεωρήσαμε ότι η πίεση διατηρείται σταθερή –οπότε κάνει "άλματα" από τη μια τιμή στην άλλη ($p_1 \rightarrow p_2 \rightarrow p_3 \rightarrow \ldots$) και δε μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο, όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα.

Αν διαλέξουμε περισσότερες –και μικρότερες– μεταβολές όγκου, η πίεση κάνει πιο μικρά "άλματα", πλησιάζοντας περισσότερο προς τον πραγματικό τρόπο που μεταβάλλεται. Έτσι, βελτιώνουμε την ακρίβειά μας στον υπολογισμό τού έργου $W = E_1 + E_2 + E_3 + \ldots$, το οποίο προσεγγίζει περισσότερο το εμβαδόν κάτω από τη γραφική παράσταση.

Όσο περισσότερες και μικρότερες είναι οι μεταβολές στις οποίες χωρίζουμε τη μεταβολή ΔV τού όγκου, τόσο το άθροισμα $W = E_1 + E_2 + E_3 + \ldots$ πλησιάζει όλο και περισσότερο προς το εμβαδόν κάτω από τη γραφική παράσταση.
Αν οι μικρές μεταβολές dV τού όγκου γίνουν άπειρες στο πλήθος και απειροελάχιστες στο μέγεθος, τότε η πίεση μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο (όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα).
Τότε το άθροισμα $E_1 + E_2 + E_3 + \ldots$ καλύπτει όλο το εμβαδόν E ανάμεσα στη γραφική παράσταση και τον άξονα V και μας δίνει (με ακρίβεια, αρκεί να μπορεί να υπολογιστεί) το ολικό έργο W, που εκτελείται πάνω στο έμβολο από το αέριο, τού οποίου ο όγκος μεταβάλλεται κατά ΔV. Δηλαδή, W = E

☞ Ας προσέξουμε ότι το έμβολο δέχεται δύναμη όχι μόνο από το αέριο, αλλά και από το περιβάλλον του (π.χ. το βάρος του).
Αυτό το οποίο περιγράψαμε και λογαριάσαμε πριν είναι το έργο που εκτελείται από τη δύναμη τού αερίου πάνω στο έμβολο.
Ας δούμε μερικά ακόμα συμπεράσματα, που προκύπτουν από τη μελέτη που κάναμε για τη μεταβολή όγκου ενός αερίου:

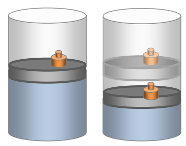
Αέριο που εκτονώνεται προσφέρει μηχανική ενέργεια στο περιβάλλον



- Όταν το αέριο εκτονώνεται (ΔV > 0),
  - ☑ η δύναμη που ασκεί στο έμβολο εκτελεί θετικό έργο (W > 0)
    –λέμε τότε ότι *«το αέριο παράγει έργο»*
  - ☑ και με αυτό εννοούμε ότι το αέριο δίνει ενέργεια στο περιβάλλον του.

Ας φανταστούμε, π.χ., ότι το δοχείο με το αέριο είναι κατακόρυφο, με το έμβολο στο πάνω μέρος του να ισορροπεί, έχοντας ένα βαρίδι από πάνω του. Αν το αέριο εκτονωθεί (π.χ. μετά από θέρμανσή του), ωθεί το έμβολο με το βαρίδι προς τα πάνω.
Άρα, η μηχανική ενέργεια τού βαριδίου –που ανήκει στο περιβάλλον τού αερίου– αυξάνεται (διότι αυξάνεται η δυναμική του ενέργεια, χωρίς ταυτόχρονη μείωση τής κινητικής).
Γι΄ αυτό ισχυριζόμαστε ότι από το αέριο που εκτονώνεται μεταφέρεται ενέργεια (σε σώματα που ανήκουν) στο περιβάλλον.
*Το έργο από την εκτόνωση ενός αερίου το λέμε συχνά **μηχανικό έργο**, διότι συντελεί στην αύξηση τής μηχανικής ενέργειας σωμάτων τού περιβάλλοντος.*

Αέριο που συμπιέζεται απορροφά μηχανική ενέργεια από το περιβάλλον



- Όταν το αέριο συμπιέζεται (ΔV < 0),
  - ☑ η δύναμη που ασκεί στο έμβολο εκτελεί αρνητικό έργο (W < 0)
    –λέμε τότε ότι *«το αέριο καταναλώνει (δαπανά) έργο»*
  - ☑ και αυτό σημαίνει ότι το αέριο δέχεται ενέργεια από το περιβάλλον του.

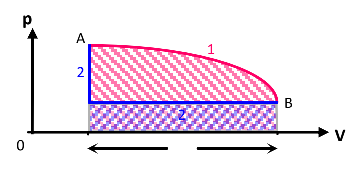
Π.χ., αν το έμβολο με το βαρίδι πάνω του υποχωρήσει, η μηχανική ενέργεια τού βαριδίου, ελαττώνεται (διότι ελαττώνεται η δυναμική του ενέργεια, χωρίς ταυτόχρονη αύξηση τής κινητικής).
Γι΄ αυτό ισχυριζόμαστε ότι από το περιβάλλον μεταφέρεται ενέργεια στο συμπιεζόμενο αέριο.

- Όταν δε μεταβάλλεται ο όγκος τού αερίου, τότε αέριο και περιβάλλον δεν ανταλλάσσουν ενέργεια με εκτέλεση έργου.

Επίσης, το έργο είναι μηδενικό, ακόμα και αν ο όγκος τού αερίου μεταβληθεί, όμως οι δυνάμεις που ασκεί στα τοιχώματα τού δοχείου δε μετακινήσουν κάποιο από αυτά.

Π.χ. έστω ένα δοχείο, χωρισμένο σε δύο διαμερίσματα, με ένα ενδιάμεσο τοίχωμα. Στο ένα διαμέρισμα υπάρχει αέριο, ενώ το άλλο είναι κενό. Αν αφαιρέσουμε το ενδιάμεσο τοίχωμα, το αέριο εκτονώνεται απότομα (⇝ μη αντιστρεπτά) και καταλαμβάνει όλο το δοχείο, χωρίς να μετακινεί κάποιο τοίχωμα. Επομένως, κατά την εκτόνωση δεν εκτελείται έργο.

- Αν ένα αέριο μεταβεί από μια αρχική σε μια τελική Κ.Ι., το έργο που εκτελείται εξαρτάται από τον τρόπο μετάβασης από τη μια κατάσταση στην άλλη (δηλαδή, από το είδος τής μεταβολής τού αερίου).



Π.χ., στο διπλανό διάγραμμα p–V βλέπουμε δύο διαφορετικές μεταβολές, με τις οποίες μια ποσότητα αερίου οδηγείται από την Κ.Ι. που αντιστοιχίζεται στο σημείο A στην Κ.Ι. που αντιστοιχίζεται στο σημείο B.
- *Κατά τη μεταβολή 1 (κόκκινη καμπύλη) εκτελέστηκε έργο ίσο με το γραμμοσκιασμένο (\\\\\\) εμβαδόν.*
- *Κατά τη μεταβολή 2 (μπλε καμπύλη) εκτελέστηκε έργο ίσο με το γραμμοσκιασμένο (///) εμβαδόν.*

(Ας σημειωθεί ότι στην πρώτη φάση αυτής τής δεύτερης μεταβολής, που αντιστοιχεί στο κατακόρυφο τμήμα τής μπλε καμπύλης, δεν εκτελείται έργο από το αέριο, διότι ο όγκος του δε μεταβάλλεται.)
Από τη σύγκριση των παραπάνω εμβαδών προκύπτει ότι το έργο που εκτελείται –πάντα μεταξύ της ίδιας αρχικής και τελικής κατάστασης– είναι διαφορετικό για κάθε μεταβολή ($E_{\backslash\backslash\backslash} > E_{///} \Rightarrow W_1 > W_2$).

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η "ενέργεια που οργανώνει" και "η ενέργεια που αποδιοργανώνει" ένα σύστημα

Ένα αέριο, λοιπόν, κατέχει ενέργεια, διότι –όπως διαπιστώσαμε– έχει τη δυνατότητα να παράγει έργο.
Αυτό ισχύει ακόμα κι αν το αέριο βρίσκεται μέσα σε ακίνητο δοχείο, που ακουμπά στο έδαφος, οπότε τόσο η κινητική όσο και η δυναμική του ενέργεια είναι μηδέν.
Άρα, η ενέργεια που κατέχει το αέριο δε σχετίζεται με τη μακροσκοπική ταχύτητά του ή τη θέση του σε πεδίο δυνάμεων.
Τα ίδια θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε για οποιοδήποτε σύστημα.

Από πού προκύπτει, όμως, αυτή η ενέργεια ;

Κάθε σύστημα αποτελείται από μόρια, που συγκροτούνται από άτομα/ιόντα κι αυτά με τη σειρά τους συγκροτούνται από άλλα σωματίδια (πρωτόνια, νετρόνια, ηλεκτρόνια κλπ).
Στο σύστημα, λοιπόν, περιέχεται μια ποσότητα ενέργειας, που απαρτίζεται από δύο κλάσματα:

☑ Από κινητική ενέργεια των σωματιδίων τού συστήματος, λόγω των μικροσκοπικών κινήσεων που κάνουν στο εσωτερικό του.

Πρόκειται για μεταφορικές ή/και περιστροφικές κινήσεις, καθώς και ταλαντώσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται προς τυχαίες κατευθύνσεις (άτακτα) και σχετίζονται με το μακροσκοπικό μέγεθος θερμοκρασία.

☑ Από δυναμική ενέργεια, λόγω των αλληλεπιδράσεων των σωματιδίων.

Τα άτομα / ιόντα / μόρια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις.

Αυτή την ενέργεια τού συστήματος, που οφείλεται στην εσωτερική κίνηση και τις αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων του, τη λέμε **εσωτερική ενέργεια** (συμβολικά **U**) –για να τη διακρίνουμε από οποιαδήποτε άλλη, εξωτερική και φαινόμενη, μορφή ενέργειας.

Τη συνολική κινητική ενέργεια των σωματιδίων ενός συστήματος, εξαιτίας των μικροσκοπικών κινήσεων που κάνουν στο εσωτερικό του, τη λέμε και **θερμική ενέργεια** τού συστήματος.
Τη συνολική δυναμική ενέργεια των σωματιδίων τού συστήματος, εξαιτίας των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων τη λέμε και **χημική ενέργεια** τού συστήματος.
Η θερμική ενέργεια είναι μια μορφή "ανοργάνωτης" ενέργειας, εξαιτίας της οποίας το σύστημα τείνει να αποδιοργανωθεί και να διασκορπιστεί στα μέρη που το απαρτίζουν (σωματίδια).
Η χημική ενέργεια είναι μια μορφή "οργανωμένης" ενέργειας, εξαιτίας της οποίας το σύστημα τείνει να διατηρήσει τη συνοχή του και να συγκρατήσει τα μέρη του.
Η εσωτερική ενέργεια τού συστήματος είναι το άθροισμα τής θερμικής και τής χημικής του ενέργειας.

Η εσωτερική ενέργεια ιδανικού αερίου

Ειδικότερα στο σύστημα τού ιδανικού αερίου, επειδή τα μόρια δεν αλληλεπιδρούν (παρά μόνο κατά τις συγκρούσεις τους), δεν κατέχουν δυναμική ενέργεια. Έτσι, η εσωτερική ενέργεια τού ιδανικού αερίου απαρτίζεται μόνο από προσθετέους που παριστάνουν την κινητική ενέργεια των μορίων του, λόγω των μικροσκοπικών κινήσεων που κάνουν στο εσωτερικό του.
Η Κινητική Θεωρία των αερίων υπολόγισε ότι, η μέση κινητική ενέργεια που κατέχει ένα μόριο ιδανικού αερίου (εξαιτίας τής μεταφορικής του κίνησης) είναι

$$\overline{K} = \frac{m\overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2}kT$$

Αν πολλαπλασιάσουμε την παραπάνω εξίσωση με το πλήθος N των μορίων τού αερίου, έχουμε την εσωτερική ενέργειά του:

$$U = N\frac{m\overline{v^2}}{2} = N\frac{3}{2}kT$$

Αν τα N μόρια τού αερίου αντιστοιχούν σε n mol, και N_A είναι ο αριθμός Avogadro, τότε $N = n\,N_A$, οπότε

$$U = n\,N_A\frac{3}{2}kT$$

Αν θυμηθούμε ότι $N_A\,k = R$ (όπου k είναι η σταθερά Boltzman και R η σταθερά τού ιδανικού αερίου), προκύπτει τελικά ότι

εσωτερική ενέργεια ιδανικού αερίου $\mathbf{U = \frac{3}{2}nRT}$

Όταν μια ποσότητα (n mol) αερίου μεταβεί από μια αρχική Κ.Ι. με θερμοκρασία $T_{αρχ}$ σε μια τελική Κ.Ι. με θερμοκρασία $T_{τελ}$, η μεταβολή τής εσωτερικής του ενέργειας είναι

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_{τελ} - U_{αρχ} \\ &= \frac{3}{2}nRT_{τελ} - \frac{3}{2}nRT_{αρχ} \\ &= \frac{3}{2}nR(T_{τελ} - T_{αρχ}) \quad ή \end{aligned}$$

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

Αν ιδανικό αέριο μεταβεί από μια αρχική σε μια τελική Κ.Ι., η μεταβολή τής εσωτερικής ενέργειάς του

☑ εξαρτάται από το πόσο μεταβάλλεται η θερμοκρασία του και

☑ δεν εξαρτάται από τον τρόπο μετάβασης από τη μια κατάσταση στην άλλη
(το είδος τής μεταβολής τού αερίου).

ΠΡΩΤΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

Γενικά, η εσωτερική ενέργεια ενός συστήματος μεταβάλλεται, όποτε αυτό ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον του.
Έχουμε αναγνωρίσει δύο διαδικασίες, με τις οποίες πραγματοποιείται μια τέτοια ανταλλαγή:
☑ τη ροή θερμότητας Q
☑ την εκτέλεση έργου W

Αναφερόμαστε –και πάλι– στο παράδειγμα τού συστήματος ενός ιδανικού αερίου.

▸ Έστω ότι το αέριο ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον μόνο με ροή θερμότητας Q.
(Αυτό μπορεί να συμβαίνει αν, π.χ., το αέριο βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο με ακλόνητα, διαθερμικά, τοιχώματα –χωρίς έμβολο.)

- Η θερμότητα θεωρείται θετική ($Q > 0$), όταν απορροφάται από το αέριο. Τότε προκαλεί ισόποση αύξηση στην εσωτερική του ενέργεια ($\Delta U > 0$), άρα και αύξηση στη θερμοκρασία του. Δηλαδή, $\mathbf{\Delta U = Q} > 0$
- Η θερμότητα θεωρείται αρνητική ($Q < 0$), όταν αποβάλλεται από το αέριο. Τότε συμβαίνει ισόποση μείωση στην εσωτερική του ενέργεια ($\Delta U < 0$), άρα και ελάττωση στη θερμοκρασία του. Δηλαδή, $\mathbf{\Delta U = Q} < 0$

Είτε η θερμότητα απορροφάται είτε αποβάλλεται από το αέριο, η μεταβολή τής εσωτερικής του ενέργειας είναι $\Delta U = Q$.

▸ Έστω ότι το αέριο ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον μόνο με εκτέλεση έργου W.
(Αυτό μπορεί να συμβεί αν, π.χ. το αέριο βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο με έμβολο, κατασκευασμένα από θερμικά μονωτικό υλικό.)

- Το έργο είναι θετικό ($W > 0$), όταν το αέριο εκτονώνεται και αποβάλλει ενέργεια στο περιβάλλον.
Τότε η εσωτερική ενέργεια τού αερίου μειώνεται ισόποσα ($\Delta U < 0$). Δηλαδή, $\mathbf{\Delta U = -W} < 0$
- Το έργο είναι αρνητικό ($W < 0$), όταν το αέριο συμπιέζεται και απορροφά ενέργεια από το περιβάλλον.
Επομένως, η εσωτερική του ενέργεια αυξάνεται ισόποσα ($\Delta U > 0$). Δηλαδή, $\mathbf{\Delta U = -W} > 0$

Είτε το αέριο παράγει είτε καταναλώνει έργο, η εσωτερική του ενέργεια μεταβάλλεται κατά $\Delta U = -W$.

▸ Όταν οι δύο διαδικασίες ανταλλαγής ενέργειας συνδυάζονται, συνεισφέρουν και οι δύο στη μεταβολή τής εσωτερικής ενέργειας τού αερίου, η οποία τότε είναι $\Delta U = Q + (-W) = Q - W$
Η παραπάνω εξίσωση (συνήθως με τη μορφή $Q = \Delta U + W$) ισχύει για κάθε θερμοδυναμικό σύστημα κι αποτελεί τον **πρώτο θερμοδυναμικό νόμο** (για συντομία θα γράφουμε 1ος Θ.Ν.). Σύμφωνα με αυτόν:
Η θερμότητα που απορροφά ή αποβάλλει ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα τής μεταβολής τής εσωτερικής του ενέργειας και του έργου που παράγει ή καταναλώνει.

☞ Ο 1ος Θ.Ν. εκφράζει τη διατήρηση τής ενέργειας σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα.
Σύμφωνα με αυτόν, είναι αδύνατη η κατασκευή τού ¨αεικίνητου¨, δηλαδή μιας μηχανής που θα παράγει έργο –και θα μας δίνει ενέργεια– από το μηδέν. *Για να παίρνουμε ενέργεια από ένα σύστημα, πρέπει πάντα να το τροφοδοτούμε με ενέργεια.*
Είναι αδύνατο, π.χ., να πάρουμε κινητική ενέργεια από ένα αυτοκίνητο, αν δεν του δώσουμε ενέργεια (από τα καύσιμα).

☞ Εφόσον ο 1ος Θ.Ν. εκφράζει τη διατήρηση τής ενέργειας, ισχύει για όλες τις μεταβολές –και για τις μη αντιστρεπτές.

☞ Για το ιδανικό αέριο –το κύριο αντικείμενο τής μελέτης μας– ο 1ος Θ.Ν. υπονοεί ότι:
Όταν αυξάνεται η εσωτερική ενέργεια τού αερίου,

- από τη σκοπιά τού μακρόκοσμου λέμε ότι έχουμε μεταφορά ενέργειας από το περιβάλλον στο αέριο, με κατανάλωση έργου (συμπίεση) ή/και με απορρόφηση θερμότητας (θέρμανση)
- από τη σκοπιά τού μικρόκοσμου λέμε ότι αυξάνεται το άθροισμα τής κινητικής και της δυναμικής ενέργειας των σωματιδίων που συγκροτούν το αέριο.

Όταν μειώνεται η εσωτερική ενέργεια τού αερίου,

- από τη σκοπιά τού μακρόκοσμου λέμε ότι έχουμε μεταφορά ενέργειας από το αέριο στο περιβάλλον, με παραγωγή έργου (εκτόνωση) ή/και με αποβολή θερμότητας (ψύξη)
- από τη σκοπιά τού μικρόκοσμου λέμε ότι μειώνεται το άθροισμα τής κινητικής και της δυναμικής ενέργειας των σωματιδίων που συγκροτούν το αέριο.

ΓΡΑΜΜΟΜΟΡΙΑΚΕΣ ΕΙΔΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΕΣ ΑΕΡΙΩΝ

Πειραματικά έχει διαπιστωθεί ότι:

Κάθε 1 kg ενός υλικού, για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του κατά 1 K (κέλβιν), χρειάζεται να ανταλλάξει με το περιβάλλον ορισμένη θερμότητα. Η θερμότητα αυτή είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό και τη λέμε **ειδική θερμότητα τού υλικού** (συμβολικά **c**).

Μονάδα μέτρησής της στο S.I. είναι το $1\ \dfrac{J}{kg \cdot K}$.

Η μάζα 1 mol του υλικού είναι M (γραμμομοριακή μάζα), οπότε για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του κατά 1 K, απαιτείται (να απορροφήσει ή να αποβάλλει) θερμότητα M c.
Τη θερμότητα αυτή τη λέμε **γραμμομοριακή ειδική θερμότητα τού υλικού** (συμβολικά **C**).

Μονάδα μέτρησής της στο S.I. είναι το $1\ \dfrac{J}{mol \cdot K}$.

Για παράδειγμα, το νερό έχει γραμμομοριακή μάζα $M = 0{,}018\ \dfrac{kg}{mol}$ *και ειδική θερμότητα* $c = 4.200\ \dfrac{J}{kg \cdot K}$.

Άρα, η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα τού νερού είναι $C = M\,c = 0{,}018\ \dfrac{kg}{mol} \cdot 4.200\ \dfrac{J}{kg \cdot K} = 75{,}6\ \dfrac{J}{mol \cdot K}$

Κάθε φορά, λοιπόν, που η θερμοκρασία τού νερού αυξάνεται κατά 1 K (ή 1 ^{o}C), απορροφάται θερμότητα
- *4.200 J από κάθε kg τού νερού ή*
- *75,6 J από κάθε mol των μορίων του.*

Αν η μάζα ενός υλικού είναι m, για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του κατά 1 K, απαιτείται (να απορροφήσει ή να αποβάλλει) θερμότητα m c.
Οπότε, αν η θερμοκρασία τού υλικού μεταβληθεί κατά ΔT, απαιτείται θερμότητα

$$Q = c\,m\,\Delta T$$

Θυμόμαστε ότι το πλήθος των mol των μορίων τού υλικού είναι $n = \dfrac{m}{M}$, οπότε $m = n\,M$.

Γι΄ αυτό, μπορούμε να γράψουμε

$$Q = c\,n\,M\,\Delta T$$

ή $$\mathbf{Q = n\,C\,\Delta T}$$

Η εξίσωση αυτή μάς δίνει τη θερμότητα που απορροφούν ή αποβάλλουν n mol μορίων ενός υλικού, που έχει γραμμομοριακή ειδική θερμότητα C, όταν η θερμοκρασία του μεταβάλλεται κατά ΔT.

Στα στερεά και τα υγρά η ειδική θερμότητα και η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα εξαρτώνται μόνο από το υλικό.
Στα αέρια εξαρτώνται και από τον τρόπο θέρμανσης/ψύξης (δηλαδή, από το είδος τής μεταβολής τού αερίου).
Ας υποθέσουμε, π.χ., ότι έχουμε 1 mol ιδανικού αερίου και θέλουμε να αυξήσουμε τη θερμοκρασία του κατά ΔT.
Με όποιο τρόπο (=είδος μεταβολής) και αν το πετύχουμε, η εσωτερική ενέργεια τού αερίου θα μεταβληθεί κατά

$$\Delta U = \frac{3}{2}\,n\,R\,\Delta T \overset{n=1}{=} \frac{3}{2}\,R\,\Delta T$$

▸ Ένας τρόπος για να αυξηθεί η θερμοκρασία τού 1 mol κατά ΔT είναι να του προσφέρουμε θερμότητα Q_V διατηρώντας σταθερό τον όγκο του *(αν το εισάγουμε π.χ. σε δοχείο, του οποίου τα τοιχώματα δεν υποχωρούν).*
Η θέρμανση θα προκαλέσει μόνο αύξηση στην εσωτερική ενέργεια τού αερίου, ενώ το έργο για τη μεταβολή όγκου του θα είναι μηδενικό, οπότε ο 1^{ος} Θ.Ν. γράφεται

$$\Delta U = Q_V$$

▸ Άλλος τρόπος για να αυξηθεί η θερμοκρασία τού 1 mol κατά ΔT είναι να του προσφέρουμε θερμότητα Q_p διατηρώντας σταθερή την πίεσή του *(αν το εισάγουμε π.χ. το σε δοχείο με έμβολο).*
Η θέρμανση θα προκαλέσει αύξηση στην εσωτερική ενέργεια τού αερίου, αλλά και εκτόνωση, με παραγωγή έργου $W_p > 0$, οπότε ο 1^{ος} Θ.Ν. γράφεται

$$\Delta U = Q_p - W_p$$

Οι μεταβολές ΔU –είπαμε ότι– είναι ίσες και στους δύο τρόπους θέρμανσης κατά ΔT, οπότε

$$Q_V = Q_p - W_p \quad \text{και, επειδή } W_p > 0, \text{ άρα}$$

$$Q_V < Q_p$$

Αυτό σημαίνει ότι, *όταν θερμαίνουμε 1 mol αερίου υπό σταθερή πίεση, πρέπει να προσφέρουμε περισσότερη θερμότητα απ΄ όση όταν το θερμαίνουμε υπό σταθερό όγκο, αν θέλουμε να επιτύχουμε την ίδια θερμοκρασιακή μεταβολή*.

Προσδιορισμός των γραμμομοριακών ειδικών θερμοτήτων τού ιδανικού αερίου

Επειδή η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα εξαρτάται και από το ποιο είναι το αέριο κι από τον τρόπο θέρμανσης/ψύξης του, για ένα ορισμένο αέριο μπορούμε να διακρίνουμε:

☑ τη **γραμμομοριακή ειδική θερμότητα C_v στην ισόχωρη μεταβολή** και

☑ τη **γραμμομοριακή ειδική θερμότητα C_p στην ισοβαρή μεταβολή**.

Έτσι, η θερμότητα που ανταλλάσσει με το περιβάλλον μια ποσότητα n mol μορίων αερίου, όταν η θερμοκρασία του αλλάζει κατά ΔΤ,

- στην ισόχωρη μεταβολή είναι $\mathbf{Q_v = n\,C_v\,\Delta T}$ και
- στην ισοβαρή μεταβολή είναι $\mathbf{Q_p = n\,C_p\,\Delta T}$.

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι

Αν ένα ιδανικό αέριο μεταβεί από μια αρχική σε μια τελική Κ.Ι., η θερμότητα που ανταλλάσσει με το περιβάλλον του εξαρτάται από τον τρόπο τής μετάβασης (=το είδος τής μεταβολής τού αερίου).

Έτσι, αν η μεταβολή τού αερίου είναι ισόχωρη, επειδή δεν εκτελείται έργο, ο 1ος Θ.Ν. (Q = ΔU + W) γράφεται

$$Q_v = \Delta U_v \qquad \text{οπότε} \qquad \Delta U_v = n\,C_v\,\Delta T$$

Ας θυμηθούμε όμως ότι –όχι μόνο στην ισόχωρη, αλλά και– σε οποιοδήποτε είδος μεταβολής και αν υποβληθεί το αέριο, μεταξύ των ίδιων Κ.Ι., η μεταβολή στην εσωτερική του ενέργεια θα είναι τόση ακριβώς. Οπότε δε χρειάζεται να σημειώνουμε το δείκτη v (για να θυμόμαστε ότι έχουμε "μεταβολή αερίου με σταθερό όγκο") στο σύμβολο ΔU_v και θα γράφουμε, απλά,

$$\mathbf{\Delta U = n\,C_v\,\Delta T}$$

Η παραπάνω εξίσωση προέκυψε χωρίς να γίνει κάπου αναφορά ότι το αέριο που μεταβάλλεται είναι ιδανικό.
Γι΄ αυτό λογαριάζει τη μεταβολή τής εσωτερικής ενέργειας οποιουδήποτε αερίου –και όχι μόνο τού ιδανικού–, όταν η θερμοκρασία αλλάζει κατά ΔΤ. Εμείς, βέβαια, θυμίζουμε ότι ασχολούμαστε μόνο με ένα ιδανικό αέριο.

Αν το αέριο υποβληθεί σε ισοβαρή μεταβολή μεταξύ των ίδιων Κ.Ι., πάλι τόσο θα μεταβληθεί η εσωτερική του ενέργεια.
Όμως, ενώ θα συμβεί ίδια μεταβολή ΔΤ στη θερμοκρασία του, η θερμότητα που θα ανταλλάξει με το περιβάλλον του, θα διαφέρει από την ισόχωρη μεταβολή και θα είναι

$$Q_P = n\,C_P\,\Delta T$$

Στην ισοβαρή μεταβολή τού αερίου μεταβάλλεται και ο όγκος του, με σταθερή πίεση, οπότε εκτελείται και έργο

$$W_P = p\,\Delta V = n\,R\,\Delta T \qquad \text{[από την καταστατική εξίσωση τού ιδανικού αερίου]}$$

Ο 1ος Θ.Ν. (Q = ΔU + W) γράφεται, τότε, $n\,C_P\,\Delta T = n\,C_v\,\Delta T + n\,R\,\Delta T$, οπότε (απλοποιώντας n και ΔΤ) προκύπτει

$$\mathbf{C_p = C_v + R}$$

Για το ιδανικό αέριο δείξαμε ότι η μεταβολή τής εσωτερικής του ενέργειας είναι, επίσης,

$$\Delta U = n\,C_v\,\Delta T = \frac{3}{2}\,n\,R\,\Delta T,$$

οπότε (απλοποιώντας n και ΔΤ) προκύπτει

$$\mathbf{C_v = \frac{3}{2}R}$$

Τέλος, επειδή $C_p = C_v + R = \frac{3}{2}R + R$, προκύπτει ότι

$$\mathbf{C_p = \frac{5}{2}R}$$

Το πηλίκο των γραμμομοριακών ειδικών θερμοτήτων τού ιδανικού αερίου είναι

$$\boldsymbol{\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{5}{3}}$$

☞ Οι θεωρητικές τιμές των C_P, C_v που υπολογίσαμε συμφωνούν με τις πειραματικές τιμές μόνο στα μονοατομικά αέρια.
Στα υπόλοιπα αέρια οι τιμές των C_P, C_v είναι σημαντικά διαφοροποιημένες.
Αυτό συμβαίνει διότι οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν θεωρητικά για το ιδανικό αέριο, στο οποίο προσομοιάζουν μόνο τα μονοατομικά αέρια.
Ας θυμηθούμε ότι θεωρήσαμε πώς τα μόριά του είναι υλικά σημεία, που κινούνται ευθύγραμμα ομαλά και αλληλεπιδρούν μόνο τις στιγμές που συγκρούονται μεταξύ τους ή με τα τοιχώματα τού δοχείου που τα περιέχει.
Έτσι, η εσωτερική ενέργεια τού ιδανικού αερίου απαρτίζεται μόνο από προσθετέους, που καθένας τους είναι η κινητική ενέργεια κάθε μορίου του, εξαιτίας τής παραπάνω απλής (μεταφορικής) κίνησης.
Σε όσα πραγματικά αέρια είναι πολυατομικά, όμως, τα μόριά τους απαρτίζονται από περισσότερα άτομα, που βρίσκονται σε κάποια απόσταση και συνδέονται μεταξύ τους. Οι κινήσεις που κάνουν τα πολυατομικά μόρια είναι συνθετότερες από των μορίων τού ιδανικού αερίου (διότι έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται στο χώρο και –σε κάποιες συνθήκες– να ταλαντώνονται). Όλες αυτές οι κινήσεις συνεισφέρουν στην εσωτερική ενέργεια.
Επιπλέον, τα πολυατομικά μόρια έχουν και δυναμική ενέργεια, που οφείλεται στην αλληλεπίδραση των ατόμων κάθε μορίου.
Η εσωτερική ενέργεια ενός πολυατομικού αερίου περιέχει και τέτοιους προσθετέους, οπότε ο θεωρητικός λογαριασμός των C_P, C_v θα έπρεπε να ήταν διαφορετικός από αυτόν που κάναμε και, μάλιστα, ιδιαίτερος για κάθε περίπτωση αερίου.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ

Στη συνέχεια, θα κάνουμε μια ανακεφαλαίωση όλων των αλλαγών που συμβαίνουν στο σύστημα ενός (ιδανικού) αερίου, αν αυτό υποβληθεί σε διαφορετικές (αντιστρεπτές) μεταβολές. Από ενεργειακή άποψη, τα ποσά ενέργειας που σχετίζονται με κάθε μεταβολή τού αερίου είναι η θερμότητα Q που ανταλλάσσει με το περιβάλλον, το έργο W που εκτελείται κατά τις μεταβολές τού όγκου του και η μεταβολή ΔU που επέρχεται στην εσωτερική του ενέργεια. Τα παραπάνω ποσά ενέργειας συνδέονται πάντα με τον $1^{ο}$ Θ.Ν. ($Q = W + ΔU$).
Αν σε μια μεταβολή τού αερίου, κάποια μεταβλητή του διατηρείται σταθερή (π.χ. η θερμοκρασία T), για να το επισημαίνουμε, θα σημειώνουμε στα παραπάνω ποσά ενέργειας το σύμβολό της με ένα δείκτη (π.χ. W_T, Q_T, $ΔU_T$).

Ισόθερμη μεταβολή Έστω μια ποσότητα (n mol) αερίου, η οποία υποβάλλεται σε ισόθερμη μεταβολή.

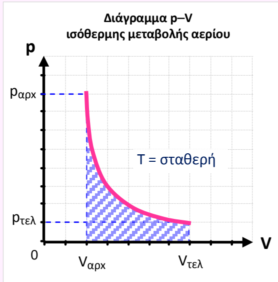
- Επειδή η εσωτερική ενέργεια εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία (η οποία δεν αλλάζει),

η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια τού αερίου είναι

$$ΔU_T = 0$$

- Ο όγκος τού αερίου μεταβάλλεται, επομένως εκτελείται έργο.

Για να το λογαριάσουμε (επειδή αλλάζει και η πίεση), σχεδιάζουμε το διάγραμμα p–V για την ισόθερμη μεταβολή, χρησιμοποιώντας το νόμο τού Μπόιλ (p V = σταθερό).
Το έργο ισούται –κατ΄ απόλυτη τιμή– με το γραμμοσκιασμένο (///) εμβαδόν, το οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε μόνο με ανώτερα μαθηματικά. Έτσι προκύπτει ότι,



το έργο από τη μεταβολή όγκου τού αερίου είναι

$$W_T = n\,R\,T\,\ell n\,\frac{V_{τελ}}{V_{αρχ}}$$

- Επειδή $ΔU_T = 0$ και κάθε μεταβολή αερίου πειθαρχεί στον $1^{ο}$ Θ.Ν. ($Q = ΔU + W$),

η θερμότητα που ανταλλάσσει το αέριο με το περιβάλλον είναι

$$Q_T = W_T$$

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζουμε τις αλλαγές που συμβαίνουν στο αέριο, στις δύο περιπτώσεις ισόθερμης μεταβολής.
(Επικαλούμαστε και το νόμο τού Μπόιλ, p V = σταθερό)

ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΑΕΡΙΟΥ	p	V	T	ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΑΠΟΒΟΛΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ισόθερμη εκτόνωση	↘	↗	σταθερή	με απορρόφηση θερμότητας, $Q_T > 0$	με κατανάλωση έργου, $W_T > 0$	0
ισόθερμη συμπίεση	↗	↘	σταθερή	με κατανάλωση έργου, $W_T < 0$	με αποβολή θερμότητας, $Q_T < 0$	0

Ισόχωρη μεταβολή Έστω μια ποσότητα αερίου, η οποία υποβάλλεται σε ισόχωρη μεταβολή.

- Τότε, ο όγκος τού αερίου διατηρείται σταθερός. Άρα,

το έργο από τη μεταβολή όγκου τού αερίου είναι

$$W_V = 0$$

- Η θερμότητα που ανταλλάσσει το αέριο με το περιβάλλον είναι

$$Q_V = n\,C_V\,ΔT$$

- Η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια τού αερίου είναι

$$ΔU = \frac{3}{2}\,n\,R\,ΔT = n\,C_V\,ΔT$$

Όπως βλέπουμε (ως συνέπεια τού $1^{ου}$ Θ.Ν., $Q = ΔU + W$), επειδή $W_V = 0$, ισχύει

$$ΔU = Q_V$$

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζουμε τις αλλαγές που συμβαίνουν στο αέριο, στις δύο περιπτώσεις ισόχωρης μεταβολής.
(Επικαλούμαστε και το νόμο τού Σαρλ, p/T = σταθερό)

ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΑΕΡΙΟΥ	p	V	T	ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΑΠΟΒΟΛΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ισόχωρη θέρμανση	↗	σταθερός	↗	με απορρόφηση θερμότητας, $Q_V > 0$	0	$ΔU > 0$
ισόχωρη ψύξη	↘	σταθερός	↘	0	με αποβολή θερμότητας, $Q_V < 0$	$ΔU < 0$

Ισοβαρής μεταβολή Έστω μια ποσότητα αερίου, η οποία υποβάλλεται σε ισοβαρή μεταβολή.

- Τότε, η πίεση τού αερίου διατηρείται σταθερή. Άρα :

Το έργο από τη μεταβολή όγκου τού αερίου, είναι

$$W_p = p\,ΔV = n\,R\,ΔT$$

- Η θερμότητα που ανταλλάσσει το αέριο με το περιβάλλον είναι

$$Q_p = n\,C_p\,ΔT$$

- Η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια τού αερίου είναι

$$ΔU = \frac{3}{2}\,n\,R\,ΔT = n\,C_V\,ΔT$$

Επειδή κάθε μεταβολή αερίου πειθαρχεί στον $1^{ο}$ Θ.Ν. ($Q = ΔU + W$), ισχύει και

$$Q_p = ΔU + W_p = \frac{5}{2}\,n\,R\,ΔT = \frac{5}{2}\,p\,ΔV \quad \text{[από την καταστατική εξίσωση]}$$

Χρήσιμοι είναι και οι λόγοι $\frac{Q_p}{\Delta U} = \gamma$, $\frac{W_p}{\Delta U} = \gamma - 1$, $\frac{Q_p}{W_p} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}$ (που μπορούν να αποδειχθούν ως άσκηση).

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζουμε τις αλλαγές που συμβαίνουν στο αέριο, στις δύο περιπτώσεις ισοβαρούς μεταβολής.
(Επικαλούμαστε και το νόμο τού Γκέι–Λουσάκ, V/T = σταθερό)

ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΑΕΡΙΟΥ	p	V	T	ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΑΠΟΒΟΛΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ισοβαρής εκτόνωση-θέρμανση	σταθερή	↗	↗	με απορρόφηση θερμότητας, $Q_p > 0$	με παραγωγή έργου, $W_p > 0$	$\Delta U > 0$
ισοβαρής συμπίεση-ψύξη	σταθερή	↘	↘	με κατανάλωση έργου, $W_p < 0$	με αποβολή θερμότητας, $Q_p < 0$	$\Delta U < 0$

Αδιαβατική μεταβολή Μια μεταβολή τού αερίου, στην οποία αυτό δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον, τη λέμε **αδιαβατική**.

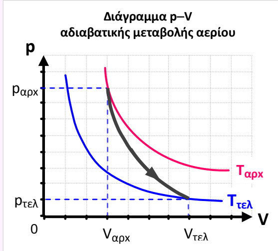
Υπάρχουν δύο τρόποι για να πραγματοποιηθεί μια τέτοια μεταβολή :

- Με θερμική μόνωση τού συστήματος.

Π.χ., αν μια ποσότητα αερίου περιέχεται σε δοχείο με έμβολο, κατασκευασμένα από θερμικά μονωτικό υλικό (δοχείο, δηλαδή, παρόμοιο με το θερμός που χρησιμοποιούμε σπίτι μας), τότε, αν μετακινηθεί το έμβολο, μεταβάλλεται η κατάσταση τού αερίου, χωρίς αυτό να απορροφήσει ή να αποβάλλει θερμότητα.

- Αν προκληθεί μια πολύ απότομη μεταβολή στον όγκο τού αερίου.

Τέτοια αδιαβατική μεταβολή έχουμε π.χ. στους βενζινοκινητήρες. Τότε, καμία ανταλλαγή θερμότητας δεν προλαβαίνει να συμβεί.
(Πρόκειται για μη αντιστρεπτή μεταβολή και εμείς, βέβαια, περιγράφουμε μόνο αντιστρεπτές μεταβολές.)



Όταν το αέριο υποβάλλεται σε αδιαβατική μεταβολή, καμία από τις μεταβλητές p, V, T δεν παραμένει σταθερή.
Αποδεικνύεται ότι, ο όγκος μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την πίεση, σύμφωνα με την εξίσωση

$$\mathbf{p\,V^{\gamma} = σταθερό} \quad \text{(σχέση p–V στην αδιαβατική μεταβολή)}$$

που είναι γνωστή ως **νόμος τού Πουασόν** (**Poisson**).
(θυμίζουμε ότι γ είναι ο λόγος των γραμμομοριακών ειδικών θερμοτήτων τού αερίου)

Στο διάγραμμα p–V της αδιαβατικής μεταβολής, η γραφική παράσταση τής παραπάνω εξίσωσης μοιάζει με υπερβολή, πιο απότομη από τις ισόθερμες καμπύλες.

Στην αδιαβατική μεταβολή αερίου, εκτός από τη σχέση τής πίεσης p με τον όγκο του V, είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε τις σχέσεις τού όγκου V με τη θερμοκρασία T και της πίεσης p με τη θερμοκρασία T. Ας τις αποδείξουμε λοιπόν.
Όταν το αέριο μεταβάλλεται αδιαβατικά από την κατάσταση ($p_{αρχ}$, $V_{αρχ}$, $T_{αρχ}$) στην κατάσταση ($p_{τελ}$, $V_{τελ}$, $T_{τελ}$), τότε πειθαρχεί:

☑ στην καταστατική εξίσωση, $p_{αρχ} V_{αρχ} = n\,R\,T_{αρχ}$ και $p_{τελ} V_{τελ} = n\,R\,T_{τελ}$

☑ στο νόμο τού Πουασόν, $p\,V^{\gamma}$ = σταθερό, οπότε $p_{αρχ} V_{αρχ}^{\ \gamma} = p_{τελ} V_{τελ}^{\ \gamma}$

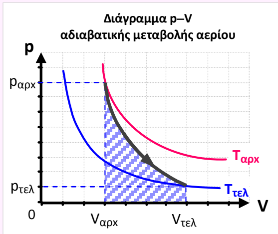
$$\xrightarrow{\text{αντικατάσταση πίεσης}} \frac{n R T_{αρχ}}{V_{αρχ}} V_{αρχ}^{\ \gamma} = \frac{n R T_{τελ}}{V_{τελ}} V_{τελ}^{\ \gamma} \quad ή \quad T_{αρχ} V_{αρχ}^{\ \gamma-1} = T_{τελ} V_{τελ}^{\ \gamma-1} \quad ή \quad \mathbf{T\,V^{\gamma-1} = σταθερό} \quad \text{(σχέση V–T)}$$

$$\xrightarrow{\text{αντικατάσταση όγκου}} p_{αρχ}\left(\frac{n R T_{αρχ}}{p_{αρχ}}\right)^{\gamma} = p_{τελ}\left(\frac{n R T_{τελ}}{p_{τελ}}\right)^{\gamma} \quad ή \quad T_{αρχ}^{\ \gamma}\, p_{αρχ}^{\ 1-\gamma} = T_{τελ}^{\ \gamma}\, p_{τελ}^{\ 1-\gamma} \quad ή \quad \mathbf{T^{\gamma}\, p^{1-\gamma} = σταθερό} \quad \text{(σχέση p–T)}$$

☞ Οι δύο σχέσεις που αποδείξαμε χρησιμοποιούνται στη λύση ασκήσεων. Επειδή, όμως, δεν αναφέρονται στη θεωρία τού σχολικού βιβλίου, όποτε τις χρησιμοποιούμε, πρέπει να τις αποδεικνύουμε.

Ενεργειακή μελέτη: Έστω μια ποσότητα αερίου, η οποία υποβάλλεται σε αδιαβατική μεταβολή.

- Ο όγκος V τού αερίου μεταβάλλεται, οπότε εκτελείται έργο.



Για να λογαριάσουμε (επειδή αλλάζει και η πίεση p), σχεδιάζουμε το διάγραμμα p–V για την αδιαβατική μεταβολή, χρησιμοποιώντας το νόμο τού Πουασόν ($p\,V^{\gamma}$ = σταθερό).
Το έργο ισούται –κατ΄ απόλυτη τιμή– με το γραμμοσκιασμένο (///) εμβαδόν, το οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε μόνο με ανώτερα μαθηματικά. Έτσι προκύπτει ότι,

το έργο από τη μεταβολή όγκου τού αερίου είναι

$$\mathbf{W_{αδ} = \frac{p_{τελ} V_{τελ} - p_{αρχ} V_{αρχ}}{1 - \gamma}}$$

- Η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια τού αερίου είναι

$$\mathbf{\Delta U = \frac{3}{2}\, n\, R\, \Delta T = n\, C_v\, \Delta T}$$

Επειδή $Q_{αδ} = 0$ και κάθε μεταβολή αερίου πειθαρχεί στον 1^{o} θ.ν. (Q = ΔU + W),
ισχύει και

$$\mathbf{\Delta U = -W_{αδ}}$$

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζουμε τις αλλαγές που συμβαίνουν στο αέριο, στις δύο περιπτώσεις αδιαβατικής μεταβολής.
(Επικαλούμαστε και το νόμο τού Πουασόν, V/T = σταθερό)

ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΑΕΡΙΟΥ	p	V	T	ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΑΠΟΒΟΛΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ισοβαρής εκτόνωση-θέρμανση	σταθερή	↗	↗	με απορρόφηση θερμότητας, $Q_p > 0$	με παραγωγή έργου, $W_p > 0$	$\Delta U > 0$
ισοβαρής συμπίεση-ψύξη	σταθερή	↘	↘	με κατανάλωση έργου, $W_p < 0$	με αποβολή θερμότητας, $Q_p < 0$	$\Delta U < 0$

Κυκλική μεταβολή Μια μεταβολή ενός συστήματος τη λέμε **κυκλική**, όταν αυτό –τελικά– επιστρέφει στην αρχική Κ.Ι.

Έστω μια ποσότητα ιδανικού αερίου, η οποία υποβάλλεται σε κυκλική μεταβολή.

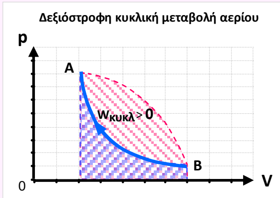
▸ Εφόσον η τελική ταυτίζεται με την αρχική Κ.Ι., η τελική θερμοκρασία τού αερίου είναι ίδια με την αρχική.
Αυτό δε σημαίνει ότι η μεταβολή είναι ισόθερμη, διότι κατά τη διάρκειά της η θερμοκρασία κυμαίνεται.
Άρα κυμαίνεται και η εσωτερική ενέργεια (η οποία εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία), αλλά καταλήγει στην αρχική της τιμή, μόλις ολοκληρώνεται η κυκλική μεταβολή. Επομένως,

η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια τού αερίου είναι

$$\mathbf{\Delta U_{κυκλ} = 0}$$

▸ Παρά το ότι, κατά την κυκλική μεταβολή, το αέριο επανέρχεται στην αρχική Κ.Ι. –άρα και στον αρχικό όγκο–, διακυμάνσεις στον όγκο συμβαίνουν, οπότε εκτελείται έργο. Σύμφωνα με το νόμο τού Πουασόν ($p\,V^{\gamma}$ = σταθερό) αλλάζει και η πίεση.
Αν θέλουμε, λοιπόν, να λογαριάσουμε το έργο που εκτελείται από το αέριο, χρειαζόμαστε το διάγραμμα p–V.
Στο διάγραμμα χωρίζουμε την κυκλική μεταβολή σε επί μέρους μεταβολές, που μπορούμε να υπολογίσουμε το έργο τους.
Το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους έργων μάς δίνει το έργο ολόκληρης τής μεταβολής.

Θεωρούμε, π.χ., μια κυκλική μεταβολή $A \xrightarrow{\text{εκτόνωση}} B \xrightarrow{\text{συμπίεση}} A$ ενός αερίου.



➨ Αν η μεταβολή πραγματοποιείται δεξιόστροφα στο διάγραμμα p–V :

Το έργο W_{AB} του αερίου στη μεταβολή $A \to B$ είναι θετικό, διότι το αέριο εκτονώνεται.
Η απόλυτη τιμή του ισούται με το (γραμμοσκιασμένο \\\\) εμβαδόν $E_{A\to B}$. Άρα,

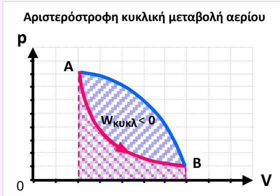
$$W_{AB} = +\,E_{A\to B}$$

Το έργο W_{BA} τού αερίου στη μεταβολή $B \to A$ είναι αρνητικό, διότι το αέριο συμπιέζεται.
Η απόλυτη τιμή του ισούται με το (γραμμοσκιασμένο ///) εμβαδόν $E_{B\to A}$. Άρα,

$$W_{BA} = -\,E_{B\to A}$$

Το έργο W για την κυκλική μεταβολή $A \to B \to A$ είναι

$$W = W_{AB} + W_{BA} = +\,E_{A\to B} + (-\,E_{B\to A}) = E_{A\to B} - E_{B\to A} > 0 \quad (\text{διότι } E_{A\to B} > E_{B\to A})$$



➨ Αν η μεταβολή πραγματοποιείται αριστερόστροφα στο διάγραμμα p–V :

τότε προκύπτει ότι $W = E_{A\to B} - E_{B\to A} < 0$ (διότι, στην περίπτωση αυτή, $E_{A\to B} < E_{B\to A}$)

Όταν η κυκλική μεταβολή πραγματοποιείται δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα στο διάγραμμα p–V, το πρόσημο τού έργου προκύπτει –αντίστοιχα– θετικό ή αρνητικό, ενώ η απόλυτη τιμή τού έργου είναι πάντα ίση με το εμβαδόν που περικλείει η γραφική παράσταση.

▸ Κάθε μεταβολή τού αερίου πειθαρχεί στον 1^{o} Θ.Ν. ($Q = \Delta U + W$) κι επειδή $\Delta U = 0$:

Η θερμότητα που ανταλλάσσει το αέριο με το περιβάλλον είναι

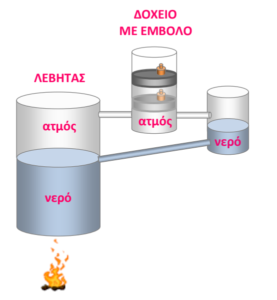
$$\mathbf{Q_{κυκλ} = W_{κυκλ}}$$

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Έχουν κατασκευαστεί μηχανές, που μετατρέπουν τη θερμότητα –η οποία παράγεται από την καύση κάποιου καυσίμου– σε μηχανικό έργο και τις λέμε **θερμικές μηχανές.**

Η πρώτη που κατασκευάστηκε ήταν η *ατμομηχανή*. Ακολούθησαν πολλές προσπάθειες για τη βελτίωση και τελειοποίηση τέτοιων μηχανών, οι οποίες κατέληξαν στις σύγχρονες *βενζινομηχανές, πετρελαιομηχανές* και *μηχανές αεροσκαφών*, καθώς και στις *τουρμπίνες (ατμοστροβίλους)* που χρησιμοποιούνται στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
Οι μηχανές αυτές αντικατέστησαν τα χέρια τού ανθρώπου και τα ζώα στην παραγωγή έργου και οδήγησαν στη βιομηχανική επανάσταση.
Το μεγαλύτερο μέρος τής ενέργειας που χρησιμοποιούμε σήμερα σχετίζεται με τη χρήση θερμικών μηχανών.

Στη συνέχεια περιγράφουμε τον τρόπο λειτουργίας μιας ατμομηχανής:

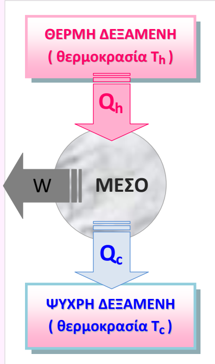


Σχηματική αναπαράσταση ατμομηχανής

Μέσα σε ένα λέβητα (=βραστήρα) περιέχεται νερό.
Καίγοντας κάποιο καύσιμο θερμαίνεται ο λέβητας και το περιεχόμενο νερό μετατρέπεται σε θερμό ατμό (=αέριο), υψηλής πίεσης.
Ο ατμός διοχετεύεται –μέσω μιας βαλβίδας εισαγωγής– σε ένα κύλινδρο και, καθώς θερμαίνεται, εκτονώνεται και σπρώχνει ένα έμβολο.
Άρα, κάποιο σώμα που βρίσκεται πάνω στο έμβολο μπορεί να ανυψωθεί και –από το έργο που εκτελεί ο ατμός– να κερδίσει μηχανική ενέργεια. Πράγματι, λοιπόν, η ατμομηχανή παίρνει θερμότητα και τη μετατρέπει σε μηχανικό έργο, συμβάλλοντας στην αύξηση τής μηχανικής ενέργειας σωμάτων.
Στη συνέχεια, ο θερμός ατμός οδηγείται –μέσω μιας βαλβίδας εξαγωγής– σε ένα συμπυκνωτή, όπου ψύχεται από τρεχούμενο νερό ή από ρεύμα αέρα, ώστε να συμπυκνωθεί (=υγροποιηθεί).
Έτσι το έμβολο υποχωρεί στην αρχική του θέση.
Το αέριο οδηγείται και πάλι στο λέβητα, για να θερμανθεί και να εκτονωθεί ξανά.
Ο "κύκλος" επαναλαμβάνεται για όσο υπάρχει διαθέσιμο καύσιμο.

Για να λειτουργήσει, λοιπόν, η ατμομηχανή, χρειάζονται δύο διαφορετικές θερμοκρασίες:
☑ μια υψηλή θερμοκρασία, για να θερμανθεί ο λέβητας, την οποία διατηρεί με ελεγχόμενο τρόπο το καιγόμενο καύσιμο και
☑ μια χαμηλή θερμοκρασία, για να ψυχθεί ο συμπυκνωτής, που την εξασφαλίζει το τρεχούμενο νερό ή το ρεύμα αέρα.
Συστήματα όπως ο λέβητας και ο συμπυκνωτής, που διατηρούν μια σταθερή θερμοκρασία, τα λέμε **δεξαμενές θερμότητας**.
Η μία δεξαμενή (τού λέβητα) είναι υψηλής θερμοκρασίας και προσφέρει θερμότητα, ενώ η άλλη δεξαμενή (του συμπυκνωτή) είναι χαμηλής θερμοκρασίας και απορροφά θερμότητα.
Κατά τη λειτουργία τής ατμομηχανής το νερό τού λέβητα αναγκάζεται να υποβληθεί σε μεταβολή τής κατάστασής του. Η μεταβολή αυτή είναι κυκλική και, όταν ολοκληρώνεται, το νερό επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση –ώστε να μπορεί η θερμότητα να μετατρέπεται κατ΄ εξακολούθηση σε μηχανικό έργο.

Γενικεύοντας όσα μας δίδαξε η λειτουργία τής ατμομηχανής, συμπεραίνουμε ότι, για τη "συνταγή" μιας θερμικής μηχανής, απαιτούνται τρία "συστατικά" :



☑ Μια **δεξαμενή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας** T_h, που προσφέρει θερμότητα Q_h (η οποία παράγεται από την καύση κάποιου καυσίμου)
- Στην ατμομηχανή η δεξαμενή αυτή είναι ο λέβητας.
- Σε μια βενζινομηχανή είναι η καιγόμενη βενζίνη μέσα στο πιστόνι (=δοχείο με έμβολο).

☑ Ένα υλικό, το οποίο απορροφά τη θερμότητα Q_h και υποβάλλεται σε κυκλική μεταβολή, κατά τη διάρκεια τής οποίας η θερμότητα μετατρέπεται σε μηχανικό έργο W.
Το υλικό αυτό το λέμε **μέσο** τής μηχανής.
- Στην ατμομηχανή το μέσο είναι το νερό, που μετατρέπεται σε ατμό και ωθεί το έμβολο στον κύλινδρο.
- Στη βενζινομηχανή ως μέσο χρησιμοποιείται ο αέρας και τα καυσαέρια, που παράγονται από την ανάφλεξη του μείγματος στον κύλινδρο.

☑ Μια **δεξαμενή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας** T_c, στην οποία αποβάλλεται θερμότητα Q_c, στο τέλος κάθε κυκλικής μεταβολής.
- Στην ατμομηχανή η δεξαμενή αυτή είναι ο συμπυκνωτής.
- Στη βενζινομηχανή είναι το περιβάλλον στο οποίο διαφεύγουν τα καυσαέρια.

Η απόδοση των θερμικών μηχανών

Μια θερμική μηχανή, λοιπόν, παρεμβάλλεται στη ροή θερμότητας ανάμεσα σε δύο δεξαμενές και μετατρέπει θερμότητα σε μηχανικό (ωφέλιμο) έργο. Κάθε κυκλική μεταβολή (ή “κύκλος”) που πραγματοποιεί η μηχανή συνδέεται

☑ με την παροχή σε κάποιο μέσο ενός ποσού θερμότητας (Q_h), από μια θερμή δεξαμενή, για να λειτουργήσει και
☑ με την απώλεια ενός ποσού θερμότητας (Q_c), που οπωσδήποτε το μέσο “ξεφορτώνει” σε μια ψυχρή δεξαμενή.

Άρα, κάθε φορά που ολοκληρώνεται μια κυκλική μεταβολή τού μέσου, αυτό απορροφά “καθαρή” ποσότητα θερμότητας

$$Q = Q_h - |Q_c|$$

και, καθώς επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση –ώστε να ξεκινήσει, στη συνέχεια, το νέο του “κύκλο”– η εσωτερική του ενέργεια αποκτά ξανά την αρχική της τιμή.

Σε κάθε “κύκλο” τού μέσου, λοιπόν, $\Delta U = 0$ κι επειδή κάθε μεταβολή πειθαρχεί στον $1^{ο}$ Θ.Ν. ($Q = \Delta U + W$) :

Η ενέργεια που μια θερμική μηχανική αποδίδει στο περιβάλλον με εκτέλεση έργου είναι $W = Q$ ή

$$\mathbf{W = Q_h - |Q_c|}$$

Πόσο, άραγε, μπορεί να είναι το κέρδος μας από τη χρήση μιας θερμικής μηχανής;
Με άλλα λόγια, συμφέρει η ενέργεια που παίρνουμε από τη μηχανή, σε σχέση με αυτήν που της δίνουμε ;

Το ποσοστό τής ενέργειας W που παράγει μια θερμική μηχανή, σε σχέση με την ενέργεια Q_h που καταναλώνει για να λειτουργήσει, το ονομάζουμε **συντελεστή απόδοσης** (συμβολικά **e**). Δηλαδή

$$\mathbf{e = \frac{W}{Q_h} \cdot 100\% = \frac{Q_h - |Q_c|}{Q_h} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{|Q_c|}{Q_h}\right) \cdot 100\%}$$

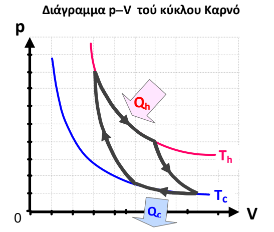
Οι ατμομηχανές με έμβολο, π.χ., έχουν απόδοση έως 18%, ενώ κάποιες που έχουν στρόβιλο φθάνουν και το 40%.
Οι βενζινομηχανές έχουν απόδοση έως 20% και οι μηχανές πετρελαίου ντίζελ έως 40%.
Είναι φανερό, πως από τη χρήση των θερμικών μηχανών, αρκετή ενέργεια πάει χαμένη. Μάλιστα, η χαμένη ενέργεια είναι θερμότητα, η οποία δε μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί και επιβαρύνει το περιβάλλον (η λεγόμενη θερμική μόλυνση).
Αν προσθέσουμε και τα καυσαέρια που διαφεύγουν στο περιβάλλον από τη χρήση των θερμικών μηχανών, τότε –μάλλον– είναι πολύ ακριβό το τίμημα που πληρώνουμε, για αυτό που οι συγκεκριμένες μηχανές μάς προσφέρουν.

Η μηχανή τού Καρνό

Ο **Καρνό** (Carnot) περιέγραψε θεωρητικά μια θερμική μηχανή, η οποία ονομάστηκε **μηχανή Καρνό.**
Η μηχανή αυτή ακολουθεί μια κυκλική (αντιστρεπτή) μεταβολή –τον **κύκλο Καρνό**–, που συνίσταται από τέσσερις επιμέρους μεταβολές, δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές.

Θα περιγράψουμε τον κύκλο Καρνό για ιδανικό αέριο, που περιέχεται μέσα σε κύλινδρο, ο οποίος φράσσεται με έμβολο.

Διάγραμμα p–V τού κύκλου Καρνό



☑ Αρχικά, το αέριο βρίσκεται σε επαφή με τη θερμή δεξαμενή, θερμοκρασίας T_h, από την οποία απορροφά θερμότητα Q_h και εκτονώνεται ισόθερμα.
☑ Στη συνέχεια, το αέριο διατηρείται θερμικά μονωμένο και εκτονώνεται αδιαβατικά, μέχρι η θερμοκρασία του να γίνει T_c.
☑ Ύστερα, το αέριο βρίσκεται σε επαφή με την ψυχρή δεξαμενή, θερμοκρασίας T_c, στην οποία αποβάλλει θερμότητα Q_c και συμπιέζεται ισόθερμα.
☑ Τέλος, το αέριο διατηρείται θερμικά μονωμένο και συμπιέζεται αδιαβατικά, μέχρι η θερμοκρασία του να γίνει T_h –ώστε να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση και να επαναληφθεί ο “κύκλος”.

Ο συντελεστής απόδοσης μιας τέτοιας, θεωρητικής, μηχανής αποδεικνύεται ότι είναι

$$\mathbf{e} = \left(1 - \frac{|Q_c|}{Q_h}\right) \cdot 100\% = \mathbf{\left(1 - \frac{|T_c|}{T_h}\right) \cdot 100\%}$$

Ο Καρνό απέδειξε ότι δε μπορεί να υπάρξει θερμική μηχανή, που θα λειτουργεί ανάμεσα σε κάποιες θερμοκρασίες T_c και T_h και να ξεπερνά σε απόδοση τη μηχανή Καρνό, που λειτουργεί ανάμεσα στις ίδιες θερμοκρασίες.
Αυτό το συμπέρασμα είναι γνωστό ως **θεώρημα Καρνό**.

Η μηχανή Καρνό, συνεπώς, είναι μια θεωρητική, εξιδανικευμένη, μηχανή, που η απόδοσή της αποτελεί το ανώτερο όριο για την απόδοση όποιων θερμικών μηχανών λειτουργούν κάτω από τις ίδιες θερμοκρασίες. Δηλαδή:

Για κάθε θερμική μηχανή, η οποία λειτουργεί σε θερμοκρασίες $T_h > T_c$, υπάρχει στην απόδοσή της ένα όριο, που δε μπορεί να ξεπεράσει:

“η απόδοση $\left(1 - \frac{|T_c|}{T_h}\right) \cdot 100\%$ της μηχανής Καρνό, που λειτουργεί στις ίδιες θερμοκρασίες”

☞ Επειδή στη φύση δε μπορεί να υπάρξει θερμοκρασία $T_c = 0$, είναι αδύνατο η απόδοση τής μηχανής Καρνό –άρα και κάθε θερμικής μηχανής– να γίνει 100%.

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Ο $2^{ος}$ Θ.Ν. κατά τους Κέλβιν και Πλανκ

Η εμπειρία μας από τις θερμικές μηχανές, αλλά και η θεωρητική απόδειξη που μας πρόσφερε ο Καρνό, μας δίδαξαν ότι :

Είναι αδύνατο να κατασκευάσουμε μια θερμική μηχανή, που να μετατρέπει πλήρως τη θερμότητα σε μηχανικό (ωφέλιμο) έργο.

Αυτό το –εμπειρικό– συμπέρασμα το λέμε **δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο** (συμβολικά θα γράφουμε $2^{ος}$ Θ.Ν.) και η διατύπωσή του ανήκει στους **Κέλβιν** και **Πλανκ** (Kelvin, Plank)**.**

Για να αντιληφθούμε τι προσθέτει ο $2^{ος}$ σε όσα λέει ο $1^{ος}$ Θ.Ν., ας παρακολουθήσουμε το παρακάτω φαινόμενο:

Ένας βράχος κατρακυλά αυθόρμητα (=χωρίς την παρέμβαση τού ανθρώπου ή κάποιας μηχανής) σε ένα βουνό.
Μόλις φθάνει χαμηλά, σταματά.
Αν μετρήσουμε τη θερμοκρασία τού βράχου, του δρόμου που διένυσε και του αέρα τριγύρω, θα δούμε ότι αυξήθηκε.
Εξετάζοντας το γεγονός αυτό από τη σκοπιά τής ενέργειας, μπορούμε να πούμε ότι, αρχικά, είχαμε μηχανική ενέργεια στο βράχο και, τελικά, έχουμε αυξημένη εσωτερική ενέργεια (κινητική ενέργεια των μορίων) στο βράχο, στο δρόμο και στον αέρα.

? *Με ποιο μηχανισμό εξαφανίστηκε, άραγε, η μηχανική ενέργεια τού βράχου;*
Το “φρενάρισμα” τού βράχου ανέλαβαν οι τριβές και οι αντιστάσεις, που με το αρνητικό τους έργο μηδένισαν τη μηχανική του ενέργεια.

? *Με ποιο μηχανισμό προστέθηκε θερμική ενέργεια στα σώματα που αναφέραμε;*
Με απορρόφηση θερμότητας από το περιβάλλον. (Καθώς ο βράχος επιβραδυνόταν, το έργο των τριβών και των αντιστάσεων μετατρεπόταν σε θερμότητα, η οποία μετασχημάτιζε την αρχική μηχανική ενέργεια σε θερμική ενέργεια.)

? *Μπορεί, μήπως, ο βράχος να επιστρέψει μόνος του στο σημείο από όπου ξεκίνησε –δηλαδή, μπορεί η θερμότητα που παράχθηκε να ξαναμετατραπεί από μόνη της σε όση μηχανική ενέργεια είχε αρχικά ο βράχος;*
Η εμπειρία μας λέει πως όχι!

? *Μπορεί, άραγε, ο βράχος να επιστρέψει με τη βοήθεια μιας θερμικής μηχανής; Αν την τροφοδοτήσουμε, δηλαδή, με όλη τη θερμότητα που παράχθηκε, μπορούμε να πάρουμε όση μηχανική ενέργεια είχε στην αρχή ο βράχος;*
Μάθαμε ότι καμία μηχανή που της δίνουμε θερμότητα δεν είναι ικανή να τη μετατρέψει εξολοκλήρου σε έργο.
(Από τη μετατροπή τής θερμότητας σε έργο θα περισσέψει και θερμότητα που θα τη χάσουμε.)
Ο βράχος, επομένως, δεν πρόκειται να φθάσει μέχρι το ύψος που βρισκόταν.

Αν θυμηθούμε τον $1^{ο}$ Θ.Ν., λέει ότι η φύση θέτει έναν περιορισμό για τις μεταβολές στη φύση:

“Η ενέργεια πρέπει να διατηρείται”

Ο $2^{ος}$ Θ.Ν. θέτει έναν ακόμα περιορισμό :

“Κάποιες μεταβολές δεν πραγματοποιούνται, έστω κι αν η ενέργεια διατηρείται”.

Ο $2^{ος}$ Θ.Ν. κατά τον Κλαούζιους

Ας δούμε ένα ακόμα παράδειγμα.
Η παρατήρηση των φαινομένων, αλλά και η εργαστηριακή εμπειρία, έχουν δείξει ότι όποτε δύο συστήματα διαφορετικής θερμοκρασίας βρίσκονται κοντά, θερμότητα ρέει αυθόρμητα, πάντα από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σύστημα, μέχρι να αποκτήσουν κοινή θερμοκρασία. (“Αυθόρμητα” θα πει “φυσικά”, δηλαδή η μεταβολή πραγματοποιείται από μόνη της, χωρίς παρέμβαση κάποιας μηχανής.)
Η φύση, λοιπόν, απαγορεύει θερμότητα να μεταφερθεί αυθόρμητα από ένα ψυχρότερο προς ένα θερμότερο σύστημα –αν και κάτι τέτοιο θα ήταν σύμφωνο με τον $1^{ο}$ Θ.Ν. (διότι όσο αυξάνεται η εσωτερική ενέργεια τού θερμότερου συστήματος, κατά το ίδιο ποσό μειώνεται η εσωτερική ενέργεια τού ψυχρότερου).
Βλέπουμε, για παράδειγμα, ότι τα ηλεκτρικά ψυγεία ή τα κλιματιστικά μεταφέρουν θερμότητα από ένα ψυχρότερο προς ένα θερμότερο χώρο –αυτό, όμως, δε γίνεται αυθόρμητα (χωρίς δηλαδή να πληρώσουμε κάτι: οι μηχανές αυτές χρειάζονται ενέργεια για να λειτουργήσουν).
Θυμόμαστε –και πάλι– λοιπόν ότι, *“κάποιες μεταβολές δεν πραγματοποιούνται, έστω κι αν η ενέργεια διατηρείται”.*

Είναι αδύνατο να κατασκευάσουμε μια θερμική μηχανή, που να μεταφέρει θερμότητα από ένα ψυχρότερο σε ένα θερμότερο σώμα, χωρίς να προσφέρουμε ενέργεια για τη λειτουργία της.
Το παραπάνω –εμπειρικό– συμπέρασμα είναι μια άλλη διατύπωση τού **δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου** και ανήκει στον **Κλαούζιους** (Clausius)**.**

Και οι δύο διατυπώσεις τού $2^{ου}$ Θ.Ν. περιγράφουν τους περιορισμούς που θέτει η φύση στην πραγματοποίηση διαδικασιών, που πειθαρχούν στον $1^{ο}$ Θ.Ν. Συνδυάζοντας και τους δύο νόμους τής Θερμοδυναμικής, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι:
Κάθε διαδικασία που πραγματοποιείται είναι αναγκασμένη να πειθαρχεί στον $1^{ο}$ Θ.Ν.
Όμως κάθε διαδικασία που πειθαρχεί στο νόμο αυτό δεν είναι αναγκασμένη να πραγματοποιηθεί, αν προσκρούει στο $2^{ο}$ Θ.Ν.

Με τα λόγια αυτά κλείνουμε την αναφορά μας στο κεφάλαιο τής Φυσικής που ονομάσαμε Θερμοδυναμική.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Με βάση τη διδακτέα ύλη Φυσικής Β΄ Λυκείου (2014–2015), προτείνω να λυθούν (ανά ενότητα και με την αναφερόμενη σειρά) οι παρακάτω ερωτήσεις / ασκήσεις

- **από το σχολικό βιβλίο ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ** (σελ. 69–81)

Θερμοδυναμικό σύστημα – Θερμοδυναμική ισορροπία	
Αντιστρεπτή μεταβολή	Ερ. 2.1
Έργο από τη μεταβολή όγκου ενός αερίου	Ερ. 2.2, 2.3, 2.4 Άσ. 2.40, 2.41, 2.43
Εσωτερική ενέργεια	Ερ. 2.5, 2.6, 2.7, 2.22, 2.8
Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος	Ερ. 2.9, 2.10
Γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες αερίων	Ερ. 2.20, 2.21, 2.23, 2.24
Ενεργειακή μελέτη αντιστρεπτών μεταβολών	Ερ. 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 Άσ. 2.42, 2.44, 2.45, 2.46, 2.47, 2.48, 2.49, 2.50 Πρ. 2.57, 2.58, 2.59, 2.60, 2.61, 2.64, 2.65, 2.67α,β, 2.68α, 2.69α,β, 2.70
Θερμικές μηχανές	Ερ. 2.25, 2.26, 2.27, 2.29, 2.30, 2.31, 2.32 Άσ. 2.52, 2.53, 2.54, 2.51 Πρ. 2.62, 2.63, 2.66
Δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος	Ερ. 2.28