

Απαιτούμενη είσοδος

$$W_{net,in} + Q_L = Q_H$$

$$W_{net,in} = Q_H - Q_L$$

Συντελεστής απόδοσης

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \Rightarrow$$

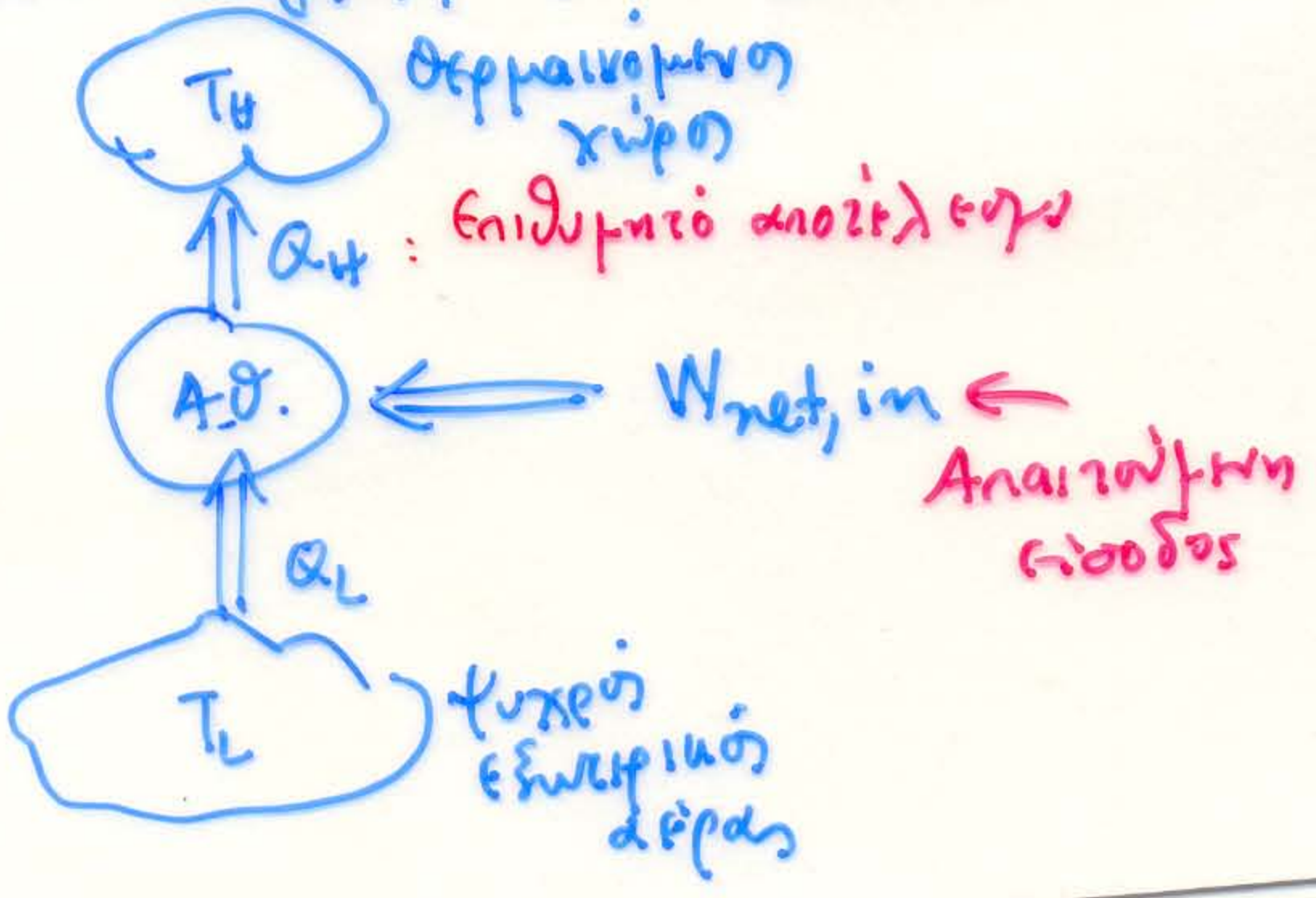
Refrigerator

$$\rightarrow COP_R = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \quad \text{Αν } Q_L > \frac{Q_H}{2} \text{ τότε } COP_R > 1$$

Σημείωση: Να διατηρηθεί το χώρο ψύξης κρύο. Δεν ενδιαφέρει η απόρριψη της θερμότητας (αέρα).

Αντλία Θερμότητας

Ιδίο διάγραμμα με ψυγίο. Μας ενδιαφέρει όμως η Q\_H



$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$$

Heat pump

$$COP_{HP} = COP_R + 1 \quad \text{Αρα } COP_{HP} > 1 \text{ πάντοτε}$$

Κριματισμός: Ένα ψυγίο όπου ο χώρος ψύξης είναι ένα δωμάτιο. Απόρριψη  $Q_L$  από το δωμάτιο και απόρριψη στον εξωτερικό αέρα.



# Β' Νόμος Θερμodynamικής: Διατύπωση Clausius

Αναφέρεται στα ψυγεία και τις αντλίες θερμότητας

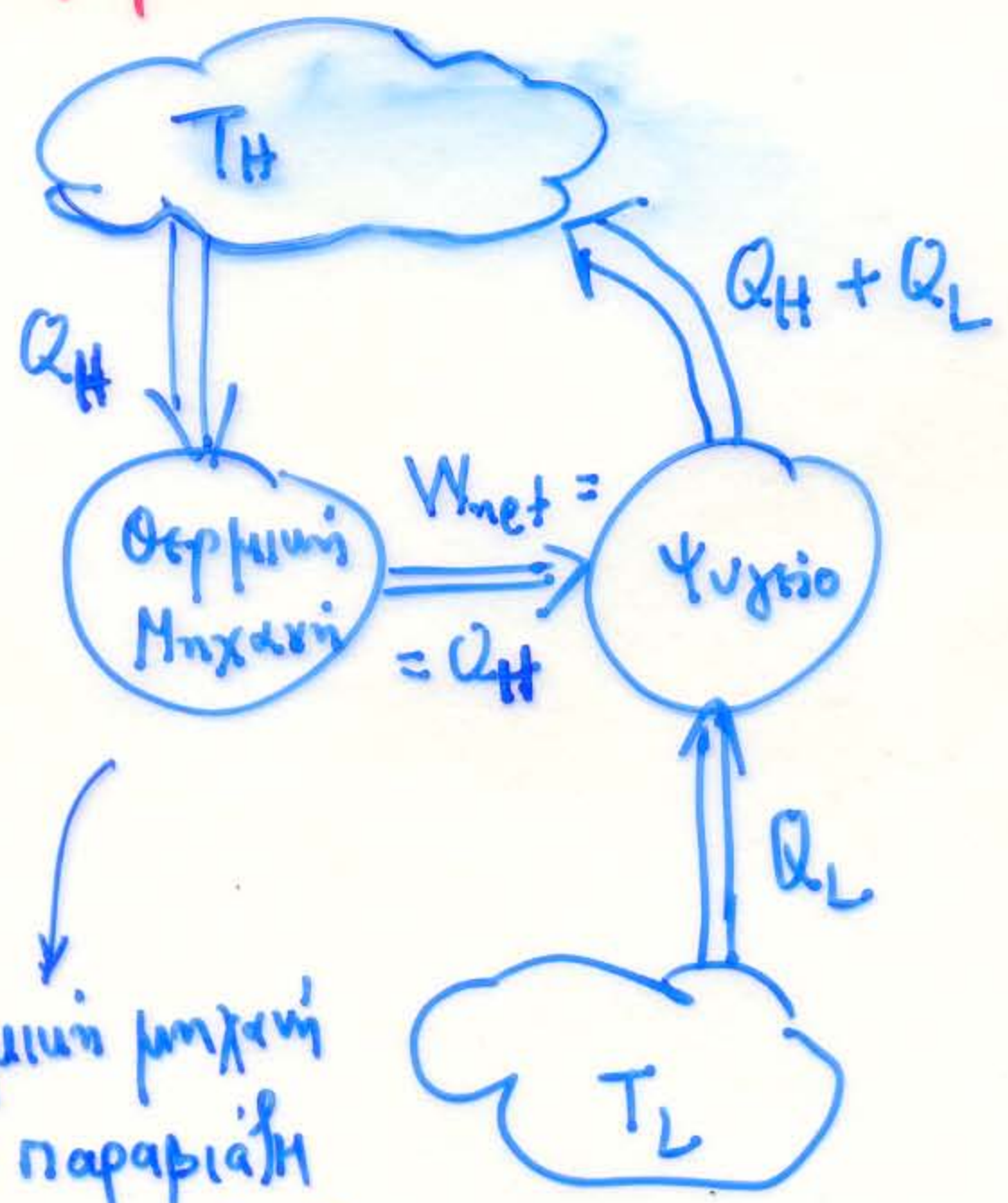
"Δεν είναι δυνατό να κατασκευαστεί μια διάταξη η οποία να λειτουργεί σε κύκλο με μοναδικό στόχο τη μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας προς ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας"

Ένα ψυγείο δεν μπορεί να λειτουργήσει χωρίς  $W_{net}$ , *in steady state* χωρίς την κατανάλωση ενός ποσού ενέργειας με τη μορφή έργου

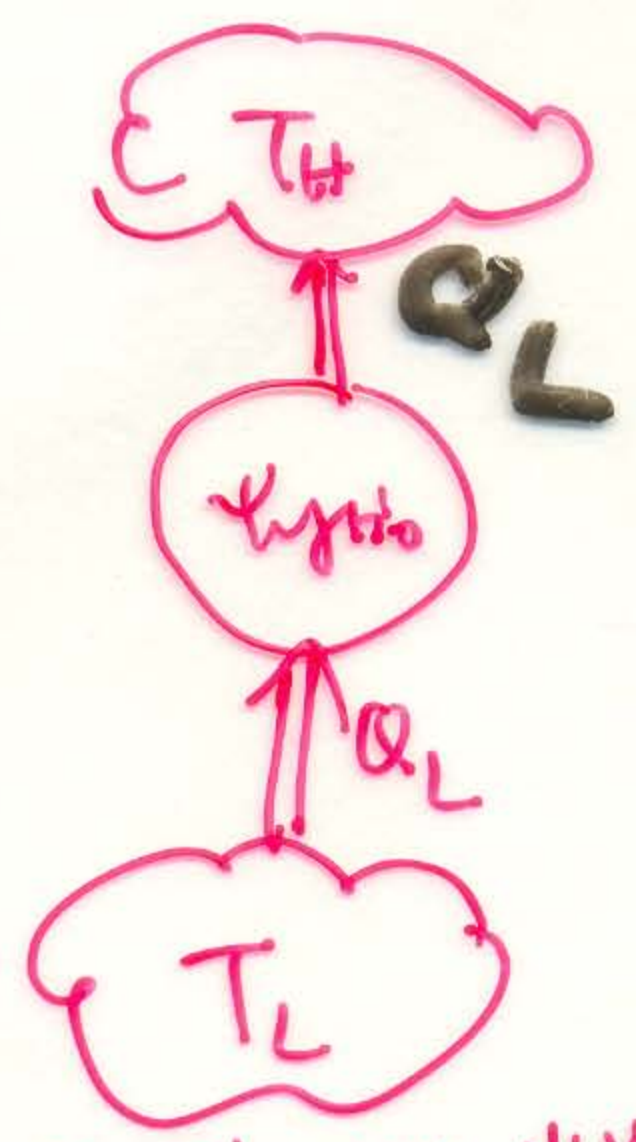
"Η διεργασία αφήνει τα ίχνη της στο περιβάλλον"

Οι δύο διατυπώσεις (Kelvin-Planck και Clausius) είναι ισοδύναμες.

Παραβίαση K-P  $\Rightarrow$  Παραβίαση Clausius και αντιστρόφως



Θερμική μηχανή που παραβιάζει διατύπωση K-P.

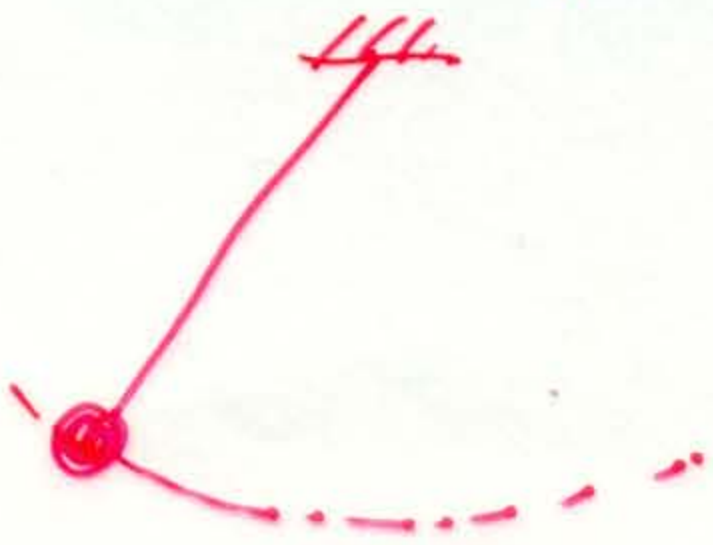


Ισοδύναμο ψυγείο που παραβιάζει διατύπωση Clausius

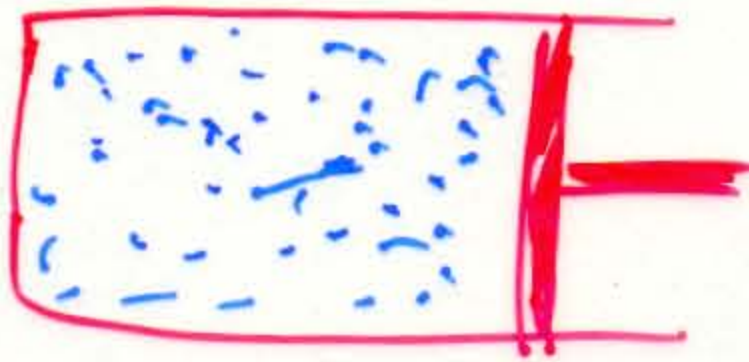


# Αντιστρέφεις και μη-αντιστρέφεις διεργασίες

Αντιστρέφει διεργασία: Η διεργασία ευκίνη που μπορεί να λάβει χώρα και κατά την αντίθετη κατεύθυνση χωρίς να αφήσει κανένα ίχνος στο περιβάλλον.



Ευκίνη χωρίς τριβές



Αντιστρέφει εκτόνωση και αντιστρέφει συμπίεση ενός αερίου (ψευδοισορροπία)

Σύστημα + Περιβάλλον επιστρέφουν στην αρχική του κατάσταση  
 $Q = 0$  και  $W = 0$

Μη-αντιστρέφει διεργασία: Σύστημα επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση  
Το περιβάλλον δεν επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση  
 $W \neq 0$ , ή  $Q \neq 0$

Οι αντιστρέφεις διεργασίες είναι εδιδανικώστες

Γιατί τις μελετάμε; → Εύκολη στην ανάλυση, γιατί το σύστημα διέρχεται από διαδοχικές καταστάσεις ισορροπίας  
→ Ιδανικά πρότυπα προς σύγκριση

Αντιστρέφει διατάξεις: Παρέχουν μέγιστο έργο ή

Απαιτούν ελάχιστο έργο.

Θεωρητικά όρια των αντίστοιχων μη-αντιστρέφει διεργασιών.



# Απόδοση μίας πραγματικής διεργασίας

↓  
Βαθμός προσέγγισης της πραγματικής διεργασίας από την αντίστοιχη αντιστρεπτή.

## Παράγοντες αναντιστρεπτότητας

Τριβή, Φυσική διαστολή, ανάμιξη δύο αερίων, μεταφορά θερμότητας εξαιτίας πεντασμένων θερμοκρασιακών διαφορών, ηλεκτρικές αντιστάσεις, αεγαστική παραμόρφωση στερεών, χημική αντίδραση.

Τριβή : Σύνθεμα εμφάνου-υψηλίνδρου



Απαιτείται κατακάλωση έργου για υπερνίκηση τριβής

↳ θερμότητα → Αύξηση T των σωματιδίων

Στην αντιστροφή κίνηση η θερμότητα τριβής δεν θα εξαχθεί έργο.  
Αντίθετα περισσότερο έργο θα μετατραπεί σε θερμότητα.

## Εκτόνωση και συμπίεση σε κατάσταση μη-ψευδοϊσορροπίας

Γρήγορη συμπίεση :

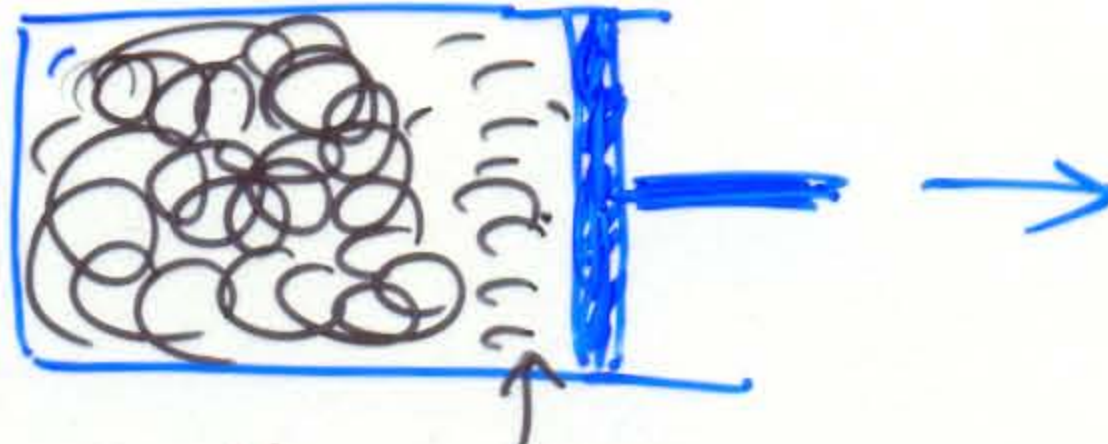


- συσπύρωση μορίων αερίων →
- ανομοιομορφία πίεσης →
- όχι διεργασία ψευδοϊσορροπίας.

\*  $W_{irrev, συμ} > W_{rev, συμ}$ . Για την συμπίεση καταναλώνεται περισσότερο έργο στην μη-αντιστρεπτή διεργασία



Γρήγορη εκτόνωση:



Μικρότερη πυκνότητα αερίων →  
→ Πραγματική υποπίεση

\*  $W_{irrev, εκτ} < W_{rev, εκτ}$  Μικρότερο παραγόμενο έργο κατά την γρήγορη εκτόνωση σε σχέση με μία αντισυμμετρική εκτόνωση

Αντισυμμετρική διεργασία:  $W_{ολ, rev} = W_{rev, ομη} - W_{rev, εκτ} = 0$

Μη-αντισυμμετρική διεργασία:  $W_{ολ, irrev} = W_{irrev, ομη} - W_{irrev, εκτ} > 0$

Άρα  $W_{ολ, irrev} > 0$ ,  $W_{net, in} > 0$  στην μη αντισυμμετρική διεργασία

Αύξηση  $U$  του αερίου ( $\Delta U_{ολ} > 0$ )

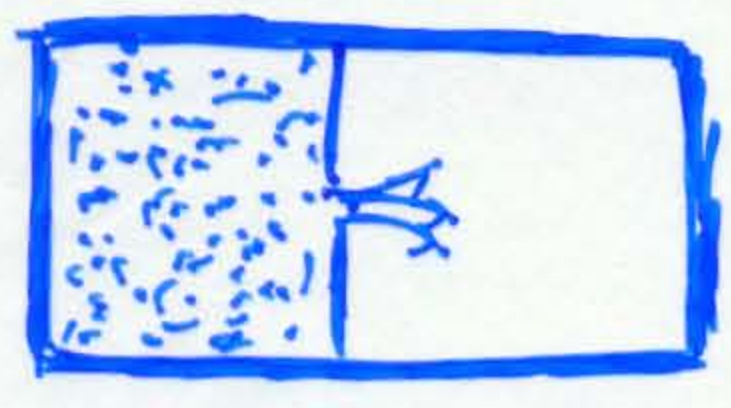
↓  
Σύστημα επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση απομακρύνοντας το  $W_{net, in} (> 0)$  υπό μορφή θερμότητας στο περιβάλλον

Το περιβάλλον τώρα για να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση πρέπει αυτή τη θερμότητα να την μετατρέψει πλήρως σε έργο, πράγμα αδύνατο.

Άρα η μη-αντισυμμετρική διεργασία αφήνει τα ίχνη της στο περιβάλλον (το "φόρτωσε" με θερμότητα)



# Ελεύθερη Συτόνωση



$Q=0$   
 $W=0$

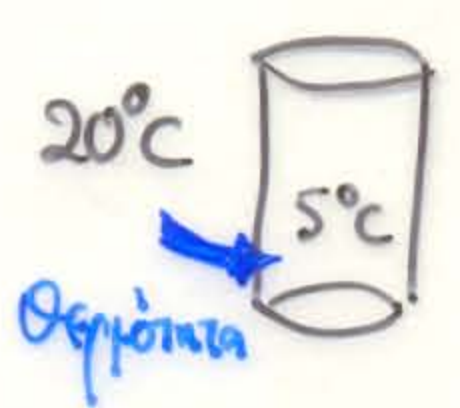
Η εναλλαγή στην αρχική κατάσταση γίνεται αναγκαστικά με συμπίεση οπότε  $W \neq 0$

Αδιαβατικό τοίχωμα

Δεν γίνεται να έχουμε αυθόρνητη συμπίεση.

Τελικά το περιβάλλον δεν μπορεί να επιτρέψει στην αρχική του κατάσταση  $\rightarrow$  Μη αυθόρνητη διεργασία

## Μεταφορά θερμότητας κατά μήκος μίας ηθεραστέρης διαφοράς θερμοκρασίας



Η αυθόρνητη διεργασία είναι αδύνατη χωρίς να "ηραχθεί" το περιβάλλον.

Για να ψυχθεί λίγο το υγρό, απαιτείται ψυχή, δηλαδή κατανάλωση έργου. Η εσωτερική ενέργεια του περιβάλλοντος έχει μεταβεί.

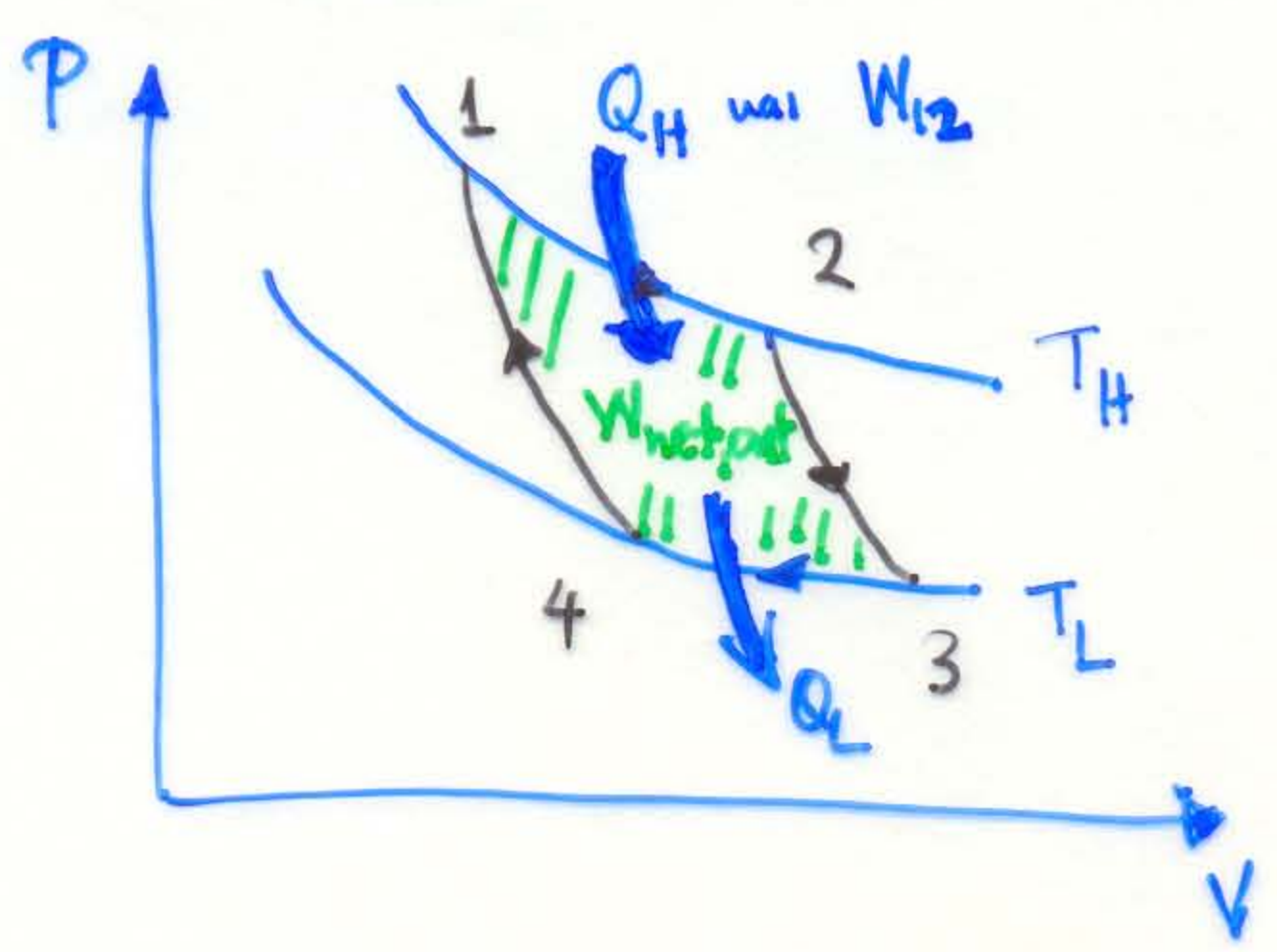
Όσο μικρότερη η διαφορά θερμοκρασίας  $\rightarrow$  τόσο μικρότερος ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας. Η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας ημπορεί την αυθόρνητη.



# Ο κύκλος Carnot

Ο πιο γνωστός αντιστρεπτός κύκλος (Carnot, 1842)  
 Η θερμική μηχανή που λειτουργεί με βάση τη αμεταβλήτη  
 υλική διεργασία ονομάζεται θερμική μηχανή του Carnot.

→ Αποτελείται από τέσσερις επιμέρους αντιστρεπτικές  
 διεργασίες : 2 ισοθερμίες + 2 αδιαβατικές

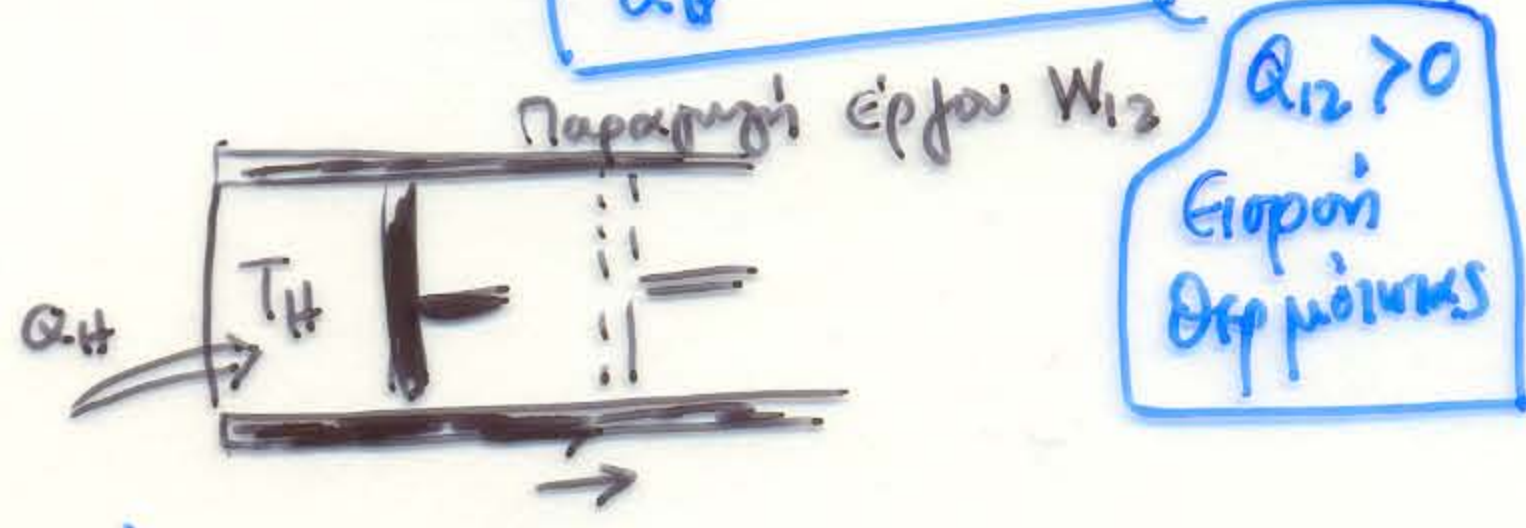


Αντιστρεπτική  
**1 → 2** : Ισοθερμία ( $T = T_H$ )  
 Εκτόνωση

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = Q_{12} - W_{12} \Rightarrow 0$$

$$\Rightarrow Q_{12} = W_{12} \quad (W_{12} > 0 \text{ Εκτόνωση})$$

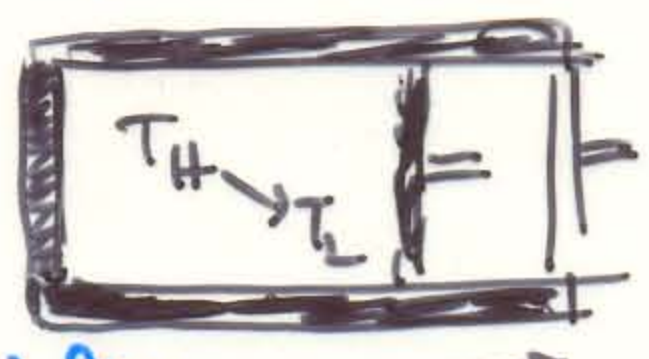
$$Q_H$$



**2 → 3** Αντιστρεπτική αδιαβατική εκτόνωση

$$\Delta U_{23} = Q_{23} - W_{23} \Rightarrow \Delta U_{23} = -W_{23}$$

Το έργο  $W_{23}$  είναι θετικό ( $W_{23} > 0$ ) (λόγω εκτόνωσης)  
 Άρα  $\Delta U_{23} < 0 \rightarrow$  Μείωση της θερμοκρασίας ( $T_H \rightarrow T_L$ )



**3 → 4** Αντιστρεπτική ισοθερμική συμπίεση ( $T = T_L$ )

$$\Delta U_{34} = Q_{34} - W_{34} \Rightarrow Q_{34} = W_{34}$$

$$W_{34} < 0 \text{ λόγω συμπίεσης} \Rightarrow Q_{34} < 0$$

Διαρροή θερμότητας



4 → 1 : Αντιστροφή αδιαβατική σφίξις

$$\Delta U_{41} = \underbrace{Q}_{=0} /_{41} - W_{41} \Rightarrow \Delta U_{41} = -W_{41}$$

$W_{41} < 0$  λόγω σφίξεως  $\Rightarrow \Delta U_{41} > 0 \rightarrow$

$\Rightarrow$  Αύξηση της  $T$  από  $T_L$  σε  $T_H$

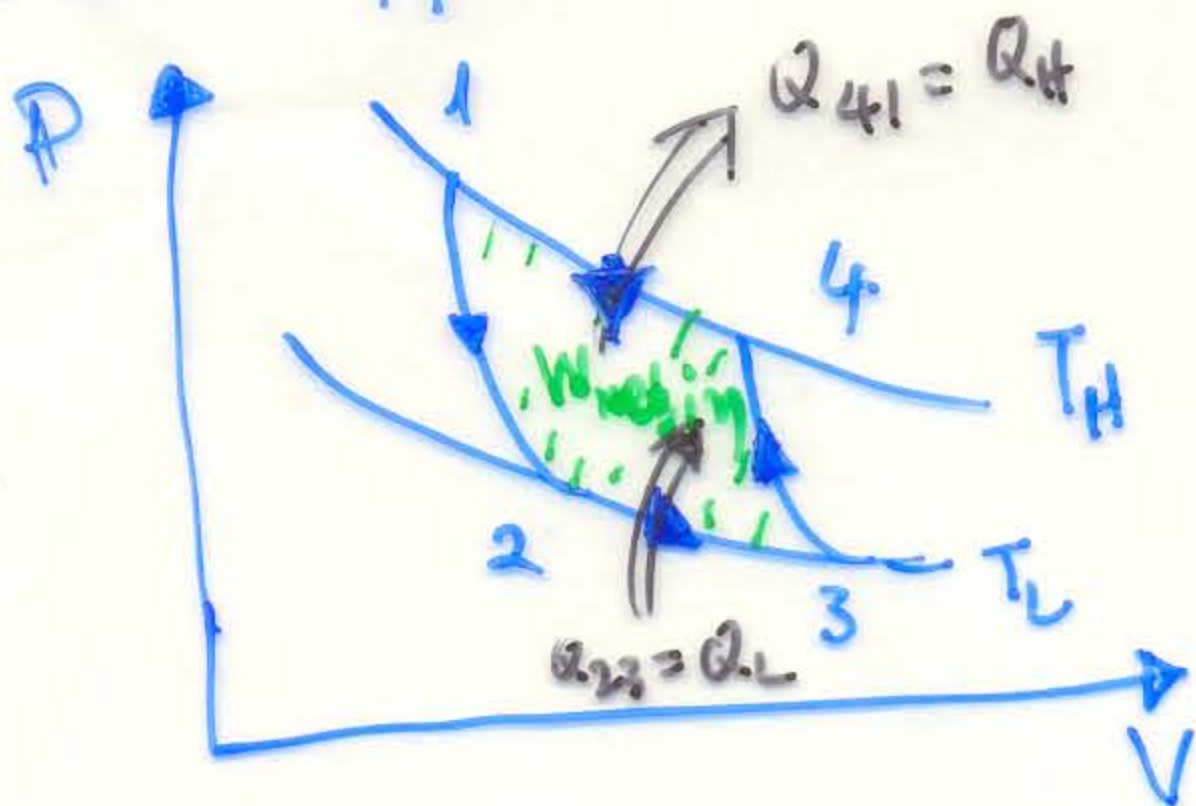
Το εμβαδόν μέσα στον κύκλο είναι

$$\begin{matrix} > 0 & > 0 & < 0 & < 0 \\ W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} = \\ = W_{net, out} > 0 \end{matrix}$$

Κύκλος Carnot: Λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση μεταξύ δύο συγκεκριμένων θερμοκρασιών. Ιδανικός κύκλος. Στον πράξη οι μηχανισμοί προσπαθούν να τον προσεγγίσουν.

Αντίστροφος κύκλος Carnot ή Κύκλος ψύξης Carnot

Ίδιος με τον "ομαλό" αλλά τα βελάκια αντιστρέφονται. Αντιστρέφονται οι κατευθύνσεις των έργων ( $W$ ) και των ποσοτήτων θερμότητας που εναλλάσσονται



Συνολικά έχει  $W_{net, in}$

ήλ. 2 → 3: Ισόθερμη εκτόνωση

$$\Delta U_{23} = Q_{23} - W_{23} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_{23} = W_{23} > 0$$

λόγω εκτόνωσης  $\Rightarrow Q_{23} > 0 \rightarrow$

$(Q_{23}$  εισερχόμενη θερμότητα)

(4 → 1): Προώθηση  $Q_{41} < 0$  (εξερχόμενη θερμότητα)



# Αξιώματα Carnot

79

Προκύπτουν από τις δύο διατυπώσεις του Β' νόμου της θερμοδυναμικής.

1. Η απόδοση μιας μη-αντιστρεψίμης (irrev) θερμικής μηχανής είναι πάντα μικρότερη από την απόδοση μιας αντιστρεψίμης (rev), όταν και οι δύο λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιών δεξαμενών.

$$\eta_{th, irrev} < \eta_{th, rev}$$

για ίδιες θερμοκρασίες δεξαμενών

2. Δύο οποιαδήποτε <sup>αντιστρεψίμη</sup> θερμικές μηχανές που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιών δεξαμενών, έχουν ίσες αποδόσεις.

$$\eta_{1, th (rev)} = \eta_{2, th (rev)}$$

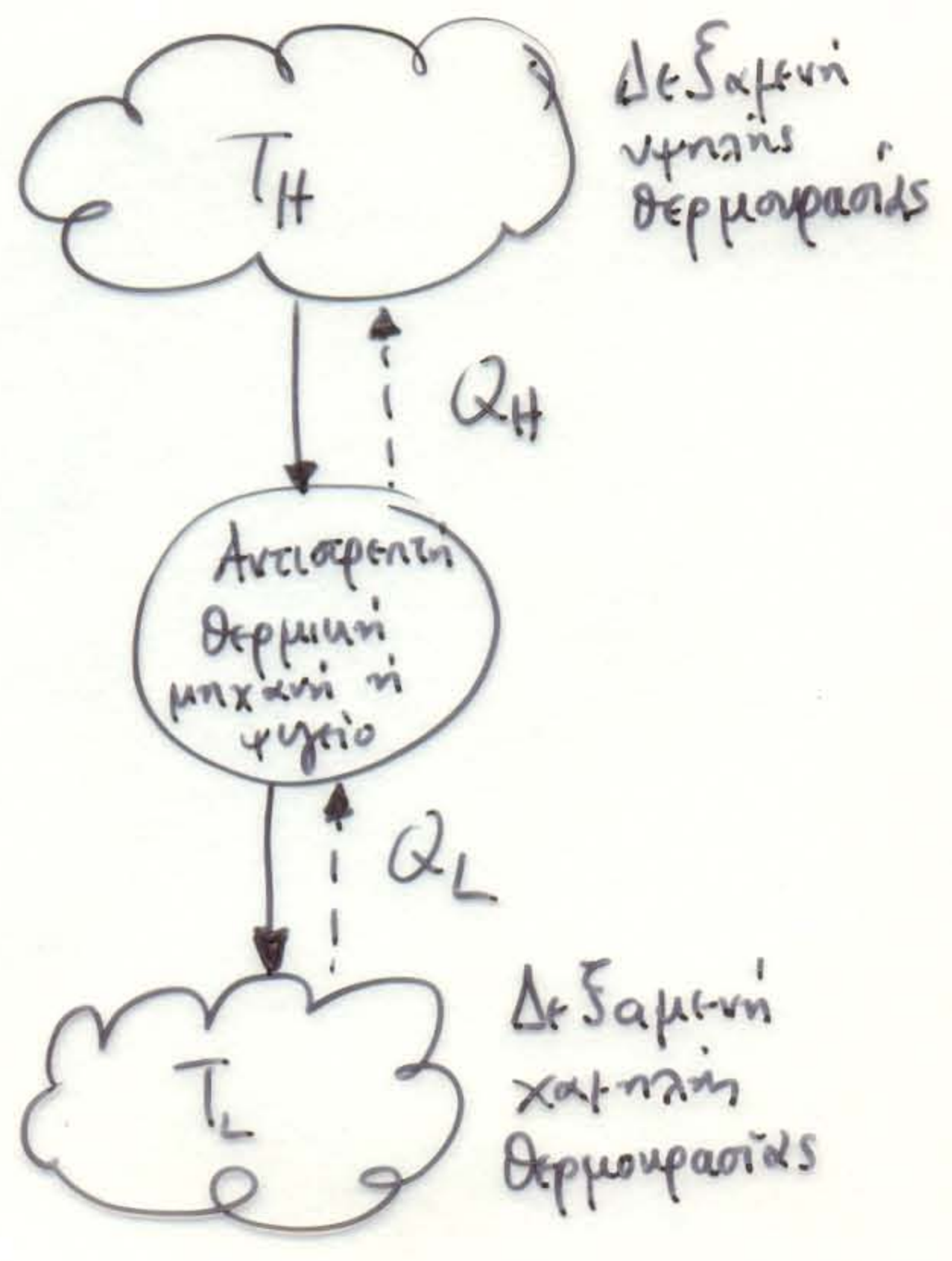
για ίδιες θερμοκρασίες δεξαμενών

## Θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών

Είναι μία κλίμακα θερμοκρασιών που είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες των ουσιών που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας.

Τέτοια είναι η κλίμακα Kelvin  
(Απόλυτη θερμοκρασία)





$$\frac{Q_{H,rev}}{Q_{L,rev}} = \frac{T_H}{T_L}$$

$T_H, T_L$ : απόλυτες θερμοκρασίες Kelvin  
 $T$  από  $0 \rightarrow \infty$

1954, Διεθνής Συνδιάσκεψη Μέτρων και Σταθμών

Δόθηκε  $T = 273,16 \text{ K}$  στο τριπλό σημείο του νερού.  
 Ορίστηκε και το μέγεθος του ενός Kelvin.

1 K είναι  $\frac{1}{273,16}$  του θερμοκρασιακού διαστήματος μεταξύ του απόλυτου μηδενός ( $T = 0 \text{ K}$ ) και του τριπλού σημείου του νερού ( $T = 273,16 \text{ K}$ ).

Οι μονάδες στις κλίμακες Kelvin και Celsius είναι ίσες.  
 $1 \text{ K} \equiv 1^\circ \text{C}$  (Αίτηση κατά  $10 \text{ K} =$  αίτηση κατά  $10^\circ \text{C}$ )

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,16$$