

## Secondo principio della termodinamica

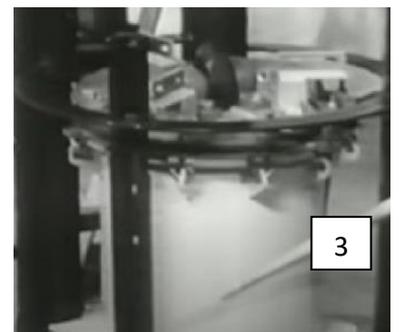
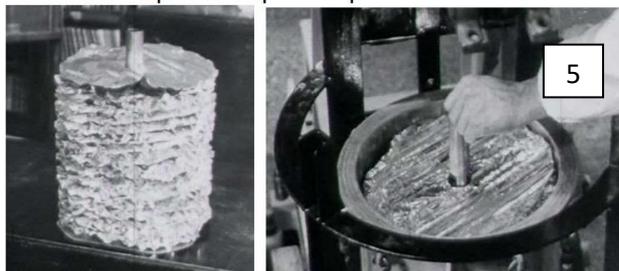
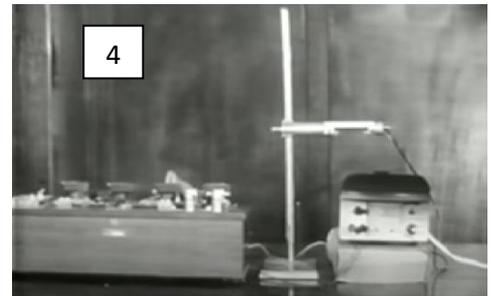
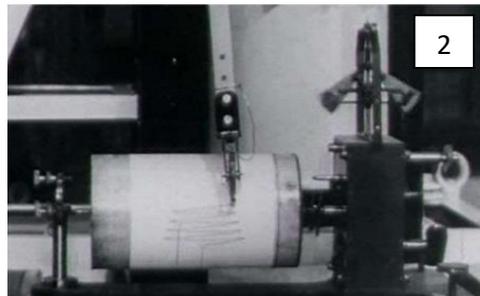
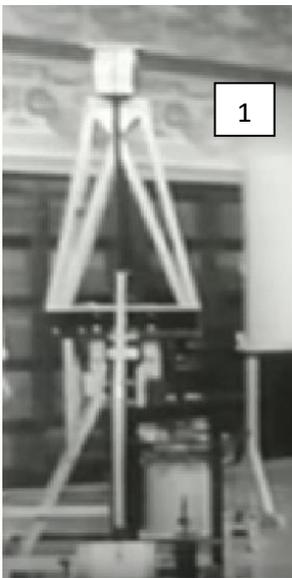
Peruzzotti Mattia, 3<sup>a</sup> A LSA

Laboratorio di fisica n°1 del Liceo Viale dei Tigli "Leonardo da Vinci" di Gallarate

**Scopo:** Verifica sperimentale del secondo principio della termodinamica ricavando attraverso delle prove sperimentali e delle deduzioni teoriche le condizioni per avere trasformazioni reversibili.

### Materiale utilizzato

- Pendolo rovesciato (1) (composto da un cilindro, pistone, e il pendolo rovesciato, in modo da ottenere periodi più lunghi)
- Registratore con pennino (2), composto da un rullo che ruota e un pennino che oscilla con il pendolo sul quale verrà rappresentato il moto.
- Pistone pneumatico (3) composto da cilindro con aria che può essere compressa o espansa attraverso una membrana mossa da un sistema leva con biella solidale al pendolo
- Termometro composto da filo di platino, ponte elettrico e galvanometro con indice luminoso. Quando varia la temperatura, varia la resistenza del filo di platino. Il termometro è connesso tramite due spine (che successivamente saranno poste nel fondo del cilindro) a un ponte ed a un galvanometro. Le variazioni di temperatura saranno indicate dallo spostamento dell'indice luminoso sul galvanometro.
- Scambiatore di calore composto da dischi di alluminio di diverse forme e diverse caratteristiche da porre nel pistone pneumatico.



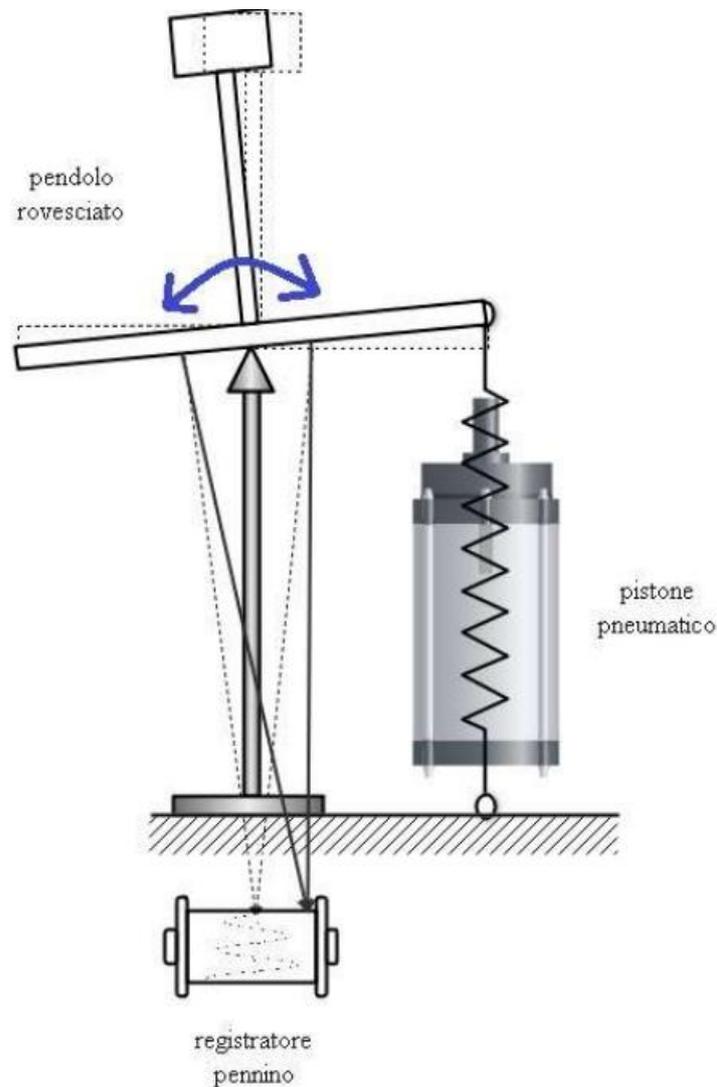
### Premessa teorica

L'esperimento proposto dal video avrà lo scopo di ricavare attraverso delle prove le basi teoriche grazie alle quali si possono realizzare **trasformazioni reversibili**.

Una trasformazione è detta reversibile quando:

- Si svolge quasi staticamente.
- Non è accompagnata da effetti dissipativi (come per esempio l'attrito).

Per realizzare la prima condizione, ovvero avvicinarsi ad un processo quasi statico, durante l'esperimento, si è fatto uso di un sistema fisico basato su oscillazioni lunghe e smorzamento che tende a zero, questo è il sistema costituito da pendolo rovesciato, cilindro e pistone che espande o comprime l'aria (come rappresentato in figura). In questo caso, il comportamento del pistone e dell'aria, si potrà avvicinare a movimenti elastici come quelli di una molla.



L'esperimento eseguito arriverà a dimostrare che le condizioni sopra descritte non possono essere soddisfatte con trasformazioni che hanno luogo in natura, che, al contrario, sono di carattere **irreversibile**. L'esperimento porterà quindi a dimostrare e verificare il **secondo principio della termodinamica**.

L'esperimento eseguito è stato permesso grazie alla visione di un filmato appartenente alla collezione di 25 film dell'opera *La fisica secondo il Physical Science Study Committee (PSSC)* pubblicata nel 1961. Il PSSC è stato un comitato scientifico nato presso il Massachusetts Institute of Technology di Boston nel 1956 con lo scopo di supportare l'insegnamento della fisica nelle scuole secondarie.

Come detto in precedenza, l'esperienza si baserà sul concetto di trasformazioni termodinamiche e di fenomeni reversibili-irreversibili. Per questo, bisogna comprendere le basi della Termodinamica e le basi teoriche delle interazioni che avvengono tra sistema e ambiente.

Con il termine **termodinamica**, si intende una branca della fisica che studia (macroscopicamente) le trasformazioni e modifiche che subiscono i sistemi termodinamici a seguito di trasferimento di energia come calore e lavoro.

La termodinamica venne scoperta non partendo da concetti fisici, ma, bensì, dall'applicazione tecnica: Newcomen e Watt, infatti, inventarono la macchina a vapore tramite sole conoscenze empiriche e senza alcuna equazione da risolvere.

Quando si tratta di trasformazioni termodinamiche, è importante introdurre anche il concetto di **sistema termodinamico**. Questo è una parte dell'ambiente in cui avvengono le trasformazioni e può essere aperto, chiuso o isolato.

Un sistema è detto:

- Aperto se può scambiare materia ed energia;
- Chiuso se può scambiare solo energia e niente materia;
- Isolato se non può avvenire lo scambio di energia e materia.

Lo scambio di energia che lungo queste trasformazioni avviene sotto forma di lavoro (energia ordinata) e/o calore (energia disordinata).

Le trasformazioni termodinamiche sono quelle in cui cambia una delle seguenti grandezze: pressione, volume o temperatura per cui l'energia fornita ad un sistema chiuso sotto la forma di lavoro e/o di calore si ritrova come energia posseduta dal sistema sotto la forma di energia interna. Per esempio, un aumento della temperatura del sistema corrisponde ad un aumento dell'energia cinetica e rotazionale posseduta dalle sue molecole, ovvero ad un aumento dell'energia che il sistema possiede a livello microscopico, cioè dell'energia interna.

Importanti grandezze termodinamiche sono il calore e la temperatura. Il calore, come detto in precedenza, è l'energia che viene scambiata tra un corpo caldo e uno freddo. Quando si pongono due corpi con diversa temperatura, a contatto tra di loro, possiamo infatti notare come questi, dopo poco tempo, siano in grado di raggiungere un equilibrio termico.

Siamo quindi in grado di introdurre il **principio Zero della Termodinamica**.

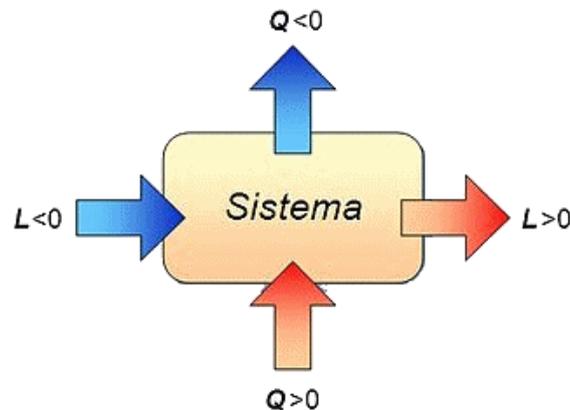
Se due corpi hanno la stessa temperatura allora sono in equilibrio termico e se due sistemi sono in equilibrio termico con un terzo sistema, allora sono in equilibrio termico anche tra di loro.

L'equilibrio di un sistema è un concetto di stabilità ovvero il sistema è in equilibrio se esso tende a non cambiare in modo spontaneo: quando sono soddisfatte le condizioni di equilibrio meccanico, chimico e termico abbiamo un sistema in equilibrio termodinamico.

Il primo principio della termodinamica è una espressione generale della legge di conservazione dell'energia in cui si include il calore.

Le forme di energia che entrano in gioco con la termodinamica sono quindi il calore e il lavoro. È importante quindi attribuire convenzionalmente dei valori positivi e negativi a queste forme di energia in base a come sono rapportate con il sistema.

Sappiamo quindi che: Il **calore** è positivo se è entrante in un sistema, negativo se uscente. Il **lavoro** è positivo se compiuto dal sistema sull'ambiente, negativo se compiuto dall'ambiente sul sistema. [rappresentato nell'immagine sottostante]

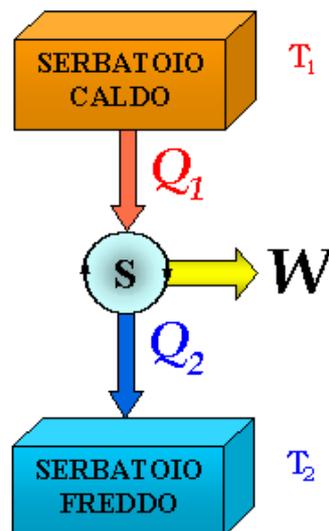


Possiamo quindi notare che il bilancio tra calore e lavoro, ovvero la differenza  $Q$  (calore) –  $W$  (lavoro) è costante e non dipende dal tipo di trasformazione (è definita quindi funzione di stato, dipende unicamente dallo stato iniziale e finale di un sistema). Possiamo introdurre una nuova grandezza e variabile che prende il nome di **energia interna** ( $U$ ).

Siamo quindi in grado di enunciare il **primo principio della Termodinamica** che esprime la conservazione dell'energia del sistema: *La differenza tra il calore e il lavoro che un sistema scambia con l'ambiente esterno eguaglia la sua variazione di energia interna.*

Le trasformazioni reali sono caratteristiche delle macchine termodinamiche; queste, però, hanno una caratteristica importante: sono trasformazioni cicliche (una qualsiasi macchina è composta da stantuffo e pistone, prima o poi lo stantuffo dovrà tornare al punto di partenza). Come detto in precedenza l'energia interna è una grandezza di stato, quindi, nel caso di macchine cicliche in cui il punto iniziale e il punto finale coincidono, la variazione di energia interna  $\Delta U$  sarà pari a 0. Possiamo quindi ricavare che:  $\Delta U = Q - W \rightarrow 0 = Q - W \rightarrow Q = W$

Per funzionare, ogni macchina ciclica, richiede di due sorgenti di calore, a differente temperatura. Il processo ciclico, infatti, dovrà assorbire calore da una sorgente calda per cederlo ad una più fredda. Parte del calore  $Q$  andrà assorbita  $Q_1$ , altra andrà espulsa  $Q_2$ . Il primo principio della termodinamica sarà quindi:  $Q_1 - Q_2 = W$ . Lo schema della macchina ciclica è rappresentato in figura:



Dove,  $Q_1$  è il calore fornito per il funzionamento della macchina,  $Q_2$  il calore di scarico,  $T_1$  temperatura del serbatoio 1,  $T_2$  temperatura del serbatoio 2 (con  $T_1 > T_2$  ).

Possiamo quindi introdurre il **Secondo principio della Termodinamica**, che si compone di diversi enunciati.

**L'enunciato di Kelvin:** *È tecnicamente e teoricamente impossibile realizzare una trasformazione termodinamica il cui unico risultato è quello di convertire interamente l'energia di una sola sorgente di calore in lavoro meccanico.*

Introduciamo quindi una nuova grandezza: il rendimento di un sistema termodinamico. Questo è definito come il rapporto tra lavoro **W** ricavato ad ogni ciclo e il calore **Q1** scaricato a ogni ciclo dalla sorgente calda.

$$\eta = \frac{W}{Q}$$

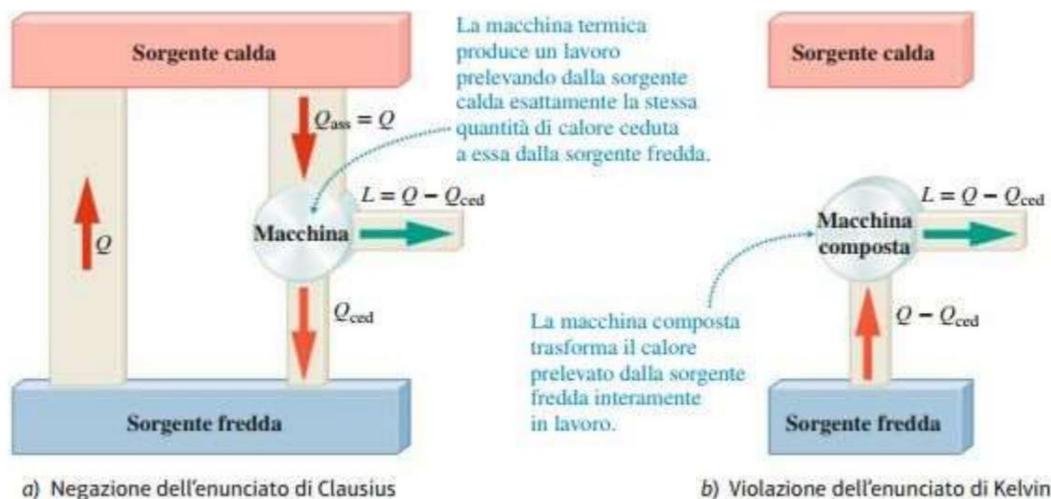
Tramite il ragionamento, si può dedurre che il rendimento di una macchina termodinamica sarà sempre inferiore al 100%, perché altrimenti produrrebbe più lavoro di quanto calore la macchina assorbe. Ma, a causa dell'enunciato di Kelvin, il rendimento non potrà essere nemmeno **pari a 100%**, in quanto ci deve per forza essere una sorgente fredda a cui scaricare parte del calore.

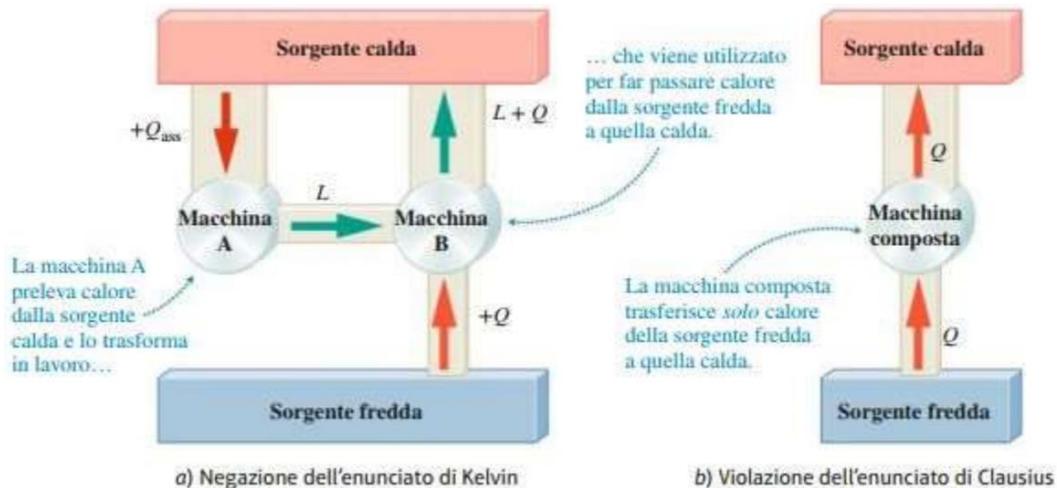
Il massimo rendimento realizzabile da una macchina termodinamica venne calcolato da Sadi Carnot il quale, fissando due temperature estreme, realizzò un ciclo ideale che prese il nome di **Ciclo di Carnot**. Il rendimento di questo ciclo, chiamato **rendimento di Carnot**, viene calcolato come:  
 $\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ , dove  $T_2$  è la temperatura minore,  $T_1$  la temperatura maggiore.

Il ciclo appena presentato, però, è un ciclo reversibile, quindi ideale e non ritrovabile in natura. Per questo si può introdurre un terzo rendimento, chiamato **rendimento di secondo principio**, che rappresenta quanto il ciclo reale sia in grado di imitare il ciclo di Carnot. Questo si calcola come:  
 $\eta_{II} = \frac{\eta}{\eta_C}$ .

L'osservazione delle macchine termodinamiche reali, portano ad enunciare un secondo enunciato della termodinamica: **l'enunciato di Clausius:** *È tecnicamente e teoricamente impossibile realizzare una trasformazione termodinamica il cui unico risultato consiste nella cessione di calore da un corpo più freddo a uno più caldo.* Il quale introduce il concetto di **unidirezionalità** dei fenomeni termodinamici. È infatti impossibile trovare un processo che possa riportare tutti i sistemi interessati dalla trasformazione allo stato iniziale. Il tempo non torna mai indietro, per questo si può affermare che il tempo acquisisca una freccia unidirezionale.

L'enunciato di Kelvin e l'enunciato di Clausius sono in stretta relazione: negando uno, si viola anche l'altro, come riportato nelle immagini sottostanti.





Un esempio di macchina termodinamica che ci permette di comprendere il valore del secondo principio della termodinamica è il frigorifero. All'apparenza l'unico risultato dell'elettrodomestico è quello di raffreddare, ovvero trasferire il calore da un corpo più freddo (la cella frigorifera) ad un corpo più caldo (le pietanze). In realtà c'è da tenere conto di un'ulteriore energia: quella elettrica. Il passaggio di calore, quindi, non è l'unico risultato della macchina termodinamica.

L'esperimento presentato nel filmato della PSSC introduce e presenta il concetto di **entropia**. Per realizzare processi più vantaggiosi, e quindi con maggior rendimento, l'obiettivo era quello di dare origine a processi reversibili (migliori anche a livello di rendimento di quelli irreversibili). Per realizzare la perfetta reversibilità, però, bisognerebbe ridurre il numero di tutti gli attriti interni del ciclo a zero. Anche i livelli del rendimento del ciclo di Carnot, sono impossibili da raggiungere, in quanto:

- le trasformazioni che lo compongono sono reversibili;
- le trasformazioni perfettamente isoterme e perfettamente adiabatiche sono irrealizzabili tecnicamente;
- le sorgenti si trovano a temperatura costante, mentre per assorbire calore da un corpo è necessario che vi sia una differenza di temperatura tra noi ed esso.

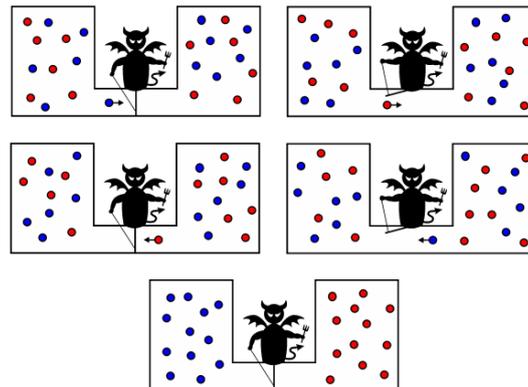
Si definisce una nuova grandezza di stato che valuti il grado di irreversibilità di una trasformazione energetica; questa è l'entropia, indicata con  $S$  e definita come il rapporto tra il calore scambiato e la temperatura a cui esso viene scambiato. La variazione di entropia in un ciclo di Carnot è pari a 0, da cui possiamo dedurre che per qualsiasi ciclo irreversibile questa aumenta.

Il secondo principio della termodinamica e il concetto di entropia portano ancora una volta al concetto di unidirezionalità dei fenomeni termodinamica, alla irreversibilità di quest'ultimi e quindi anche al concetto di *morte termica*. Tutte le macchine funzionano grazie alla differenza di temperatura tra due sorgenti, una calda ed una fredda. Se, però, tutto l'universo avesse stessa temperatura, otterremmo che il rendimento di Carnot sarebbe pari a 0 e quindi ci ritroveremmo impossibilitati a trasformare calore il lavoro, portando quindi alla morte termica.

Quando si trattano le trasformazioni termodinamiche, è importante introdurre anche il concetto di **probabilità termodinamica**, strettamente collegato al **quarto enunciato della termodinamica**.

Per comprendere al meglio questi concetti Maxwell propose un paradosso che prese il nome di **Diavoleto di Maxwell**. Consideriamo due recipienti A e B contenenti un gas a temperatura e pressione uniforme, e comunicanti attraverso una parete scorrevole controllata da un Diavoleto. Questo è in grado di tenere aperta la valvola solo quando una particella, durante il suo moto disordinato, sbatte contro la paratia con alta velocità dalla parte di A, o con velocità bassa dalla parte

di B. In questo modo si otterrà un sistema in cui si avrà un recipiente A contenete molecole tutte uguali (con stesse caratteristiche), e un recipiente B con molecole di caratteristiche uguali, ma diverse rispetto a quelle dell'altro contenitore.



Nel paradosso proposto, il diavoletto non mangia, non beve, non respira; dunque, si crea spontaneamente una diminuzione di entropia, perché si è ottenuto uno squilibrio di pressione senza alcun bisogno di fornire lavoro dall'esterno.

La risoluzione al paradosso arrivò successivamente con Szilárd e Brillouin, i quali arrivarono ad affermare che il diavoletto, per svolgere il suo lavoro, necessitava della luce per distinguere le diverse molecole. La luce rappresenta quindi il lavoro fornito al sistema, che provoca un aumento di entropia che supera il livello generato dalla divisione effettuata dal diavoletto.

Il paradosso, però, permette di introdurre il concetto di probabilità. Infatti, il fenomeno presentato potrebbe verificarsi anche con una spontanea (cioè senza effetto dei diavoletti) diminuzione di entropia. La probabilità che le molecole prese in considerazione siano tutte nel contenitore A o nel contenitore B, viene calcolata come  $1/2^{\text{numero di molecole}}$ . Trattandosi di un gas, il minor numero di molecole utilizzabile è rappresentato dal numero di Avogadro, il calcolo sarà quindi pari a:  $1/2^N$ , il cui risultato si avvicina quasi allo 0. Possiamo quindi dedurre che è **infinitamente improbabile** che le molecole di un gas si dividano spontaneamente, causando una diminuzione di entropia, ma non impossibile. La probabilità termodinamica è infatti una probabilità i cui valori sono così piccoli da essere trascurabili e impone una freccia del tempo verso la massima probabilità.

Da questo concetto deriva inoltre il **quarto enunciato del secondo principio della Termodinamica**: *ogni sistema, abbandonato a sé stesso, evolverà verso la situazione la cui probabilità è massima.*

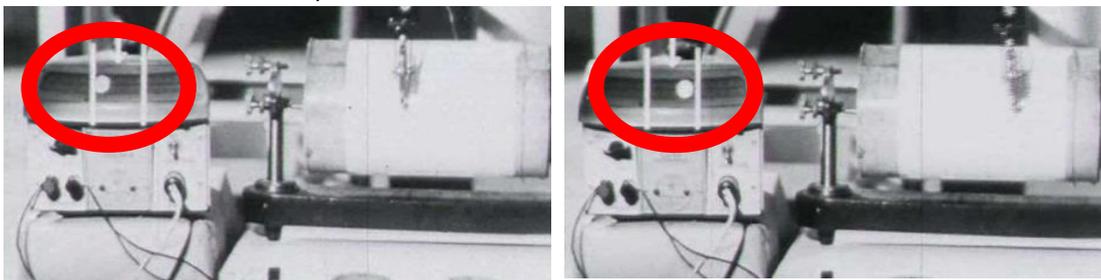
L'entropia sarà quindi la misura del disordine, molto più probabile rispetto all'ordine.

### Esecuzione dell'esperienza

Tramite il filmato all'URL: <https://youtu.be/MYBBJ2qDNq0>, siamo stati in grado di verificare sperimentalmente il secondo principio della termodinamica, sfruttando il concetto di coefficiente di smorzamento. Il filmato introduce lo studio di una macchina costituita da un pendolo rovesciato collegato con una biella ad una membrana di un pistone pneumatico dove l'aria è costretta a comprimersi ed espandersi con la conseguenza di formare con il pendolo un sistema oscillante perché l'aria si comporta come una molla. Vengono effettuate diverse prove con e senza il pistone pneumatico.

Lo scopo delle diverse prove sarà **determinare il coefficiente di smorzamento** dovuto agli attriti interni al sistema.

1. Dopo un'introduzione sui concetti di unidirezionalità dei fenomeni termodinamici tramite la visione del fenomeno (come una pallina che rimbalza, o il movimento di un pendolo) e la successiva visione del fenomeno al contrario (tramite un proiettore), la presentazione del sistema utilizzato, abbiamo iniziato il vero e proprio esperimento.
2. Per la **prima prova** si sostituisce il cilindro con una molla, in modo tale da calcolare lo smorzamento dovuto solamente agli attriti del pendolo inverso. Il pendolo viene fatto oscillare e le molle reagiscono alla compressione, estendendosi. Le oscillazioni sono riportate tramite il registratore con pennino su un foglio. A causa degli attriti, le oscillazioni tenderanno a diminuire di ampiezza.
3. Viene tolto il foglio ed eseguiti opportuni calcoli per ottenere lo smorzamento.
4. Si procede con l'esecuzione della **seconda prova**. La molla viene sostituita con il cilindro e il pistone pneumatico, tramite il quale si calcolerà il coefficiente di smorzamento dell'aria. Le oscillazioni sono riportate da un pennino e un rullo.
5. Il nuovo grafico viene confrontato con il precedente e, ancora una volta vengono eseguiti opportuni calcoli, per ottenere il coefficiente di smorzamento.
6. A causa dei risultati ottenuti e per verificare le ipotesi compiute dallo sperimentatore, si procede con successive prove. Per verificare la reale presenza di variazioni di temperatura, bisogna utilizzare un termometro estremamente preciso (descritto nella sezione materiale utilizzato). Prima di procedere con la misura dello smorzamento della **terza prova**, si testa l'efficacia del termometro. Abbiamo posto il termometro all'interno del cilindro, notando lo spostamento dell'indice luminoso quando il pistone comprimeva o espandeva l'aria presente nel cilindro in corrispondenza delle oscillazioni del pendolo (come riportato in figura, l'indice variava tra due valori limite).



7. La misura della variazione della temperatura non è sufficiente per dimostrare l'ipotesi. È necessario ridurre di molto lo scambio di calore tra l'aria contenuta nel cilindro e le pareti del cilindro stesso e verificare come la riduzione del calore scambiato modifica lo smorzamento del pendolo inverso. Viene quindi utilizzato uno scambiatore di calore formato da 30 dischi di alluminio corrugato che viene posto all'interno del cilindro, ponendo attenzione a togliere un blocchetto di alluminio della stessa massa dello scambiatore (già all'interno originariamente) per evitare di variare il volume dell'aria.
8. Si procede con l'analisi del grafico disegnato dal pendolo inverso e al calcolo del coefficiente di smorzamento, confrontandolo con i risultati ottenuti precedentemente.
9. Studiando i risultati ottenuti e per evitare che il valore appena calcolato fosse dovuto ad attriti dello scambiatore di calore, si esegue una **quarta prova**, con la quale viene modificata la forma dello scambiatore di calore utilizzandone uno a forma di spirale (arrotolata su sé stessa), facendo attenzione che le spire fossero abbastanza uniformi.
10. Successivamente si procede con un'ulteriore prova durante la quale si utilizza uno scambiatore di calore con superficie differente. Inseriamo uno scambiatore di calore con 100 dischi, dopo aver tolto il blocchetto di alluminio presente all'interno del cilindro, in modo tale

che il volume dell'aria fosse lo stesso. Eseguiamo le consuete misure riguardo alla **quinta prova**.

11. Si procede con una **sesta prova**, con la quale si inserisce nel cilindro uno scambiatore di calore con 400 dischi. Aumentiamo ancora la superficie, notando dal galvanometro che la temperatura rimane quasi costante.
12. Si sono analizzati i dati raccolti e confrontati con dati riportati e calcolati precedentemente.

### Dati e la loro elaborazione

Nella tabella sottostante sono riportate le rispettive prove, con il grafico risultato e i calcoli relativi agli smorzamenti.

Prova	Descrizione	n	Coeff. smorzamento	Osservazioni
1	Solo molla	32	0,03	
2	Cilindro senza scambiatore	9,5	0,105	Smorzamento molto maggiore
3	Cilindro con scambiatore da 30 dischi	2	0,5	Aumentato in modo notevole
4	Cilindro con scambiatore a spirale (e massa pari alla prova precedente)	2	0,5	Pari a quello precedente, difficile pensare a banale attrito
5	Cilindro con scambiatore da 100 dischi	4	0,25	Il salto di temperatura è decresciuto in una notevole.
6	Cilindro con scambiatore da 400 dischi	12	0,08	Esclude completamente gli effetti attrito.

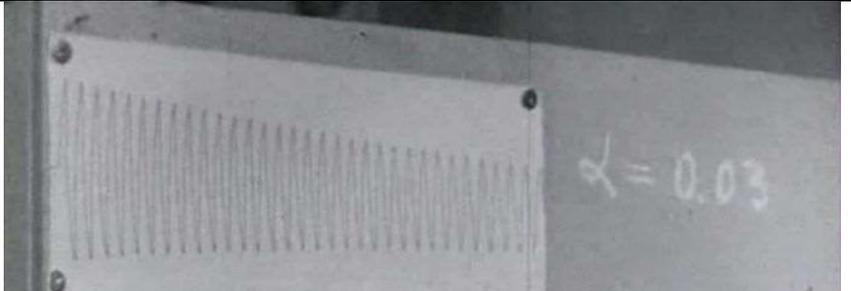
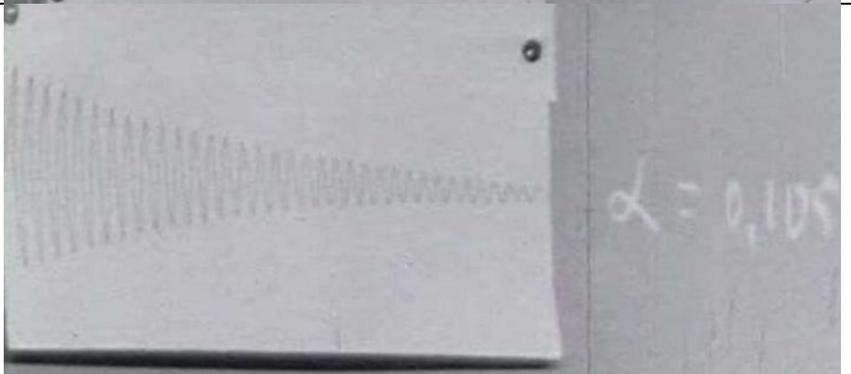
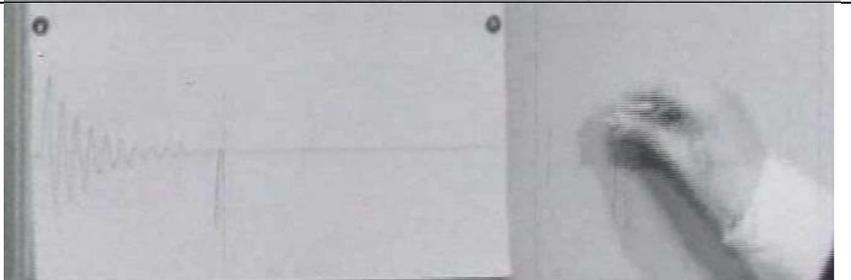
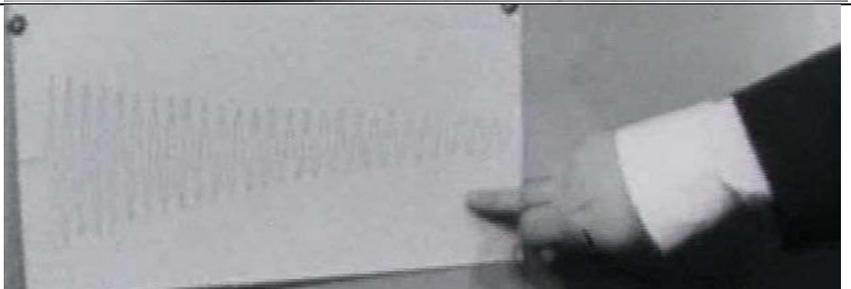
Dove:

- **N**, indica il numero delle oscillazioni necessarie per ridurre del 50% l'ampiezza iniziale
- **Coefficiente di smorzamento**, viene calcolato come  $\alpha = \frac{1}{n}$ , l'inverso del numero delle oscillazioni.

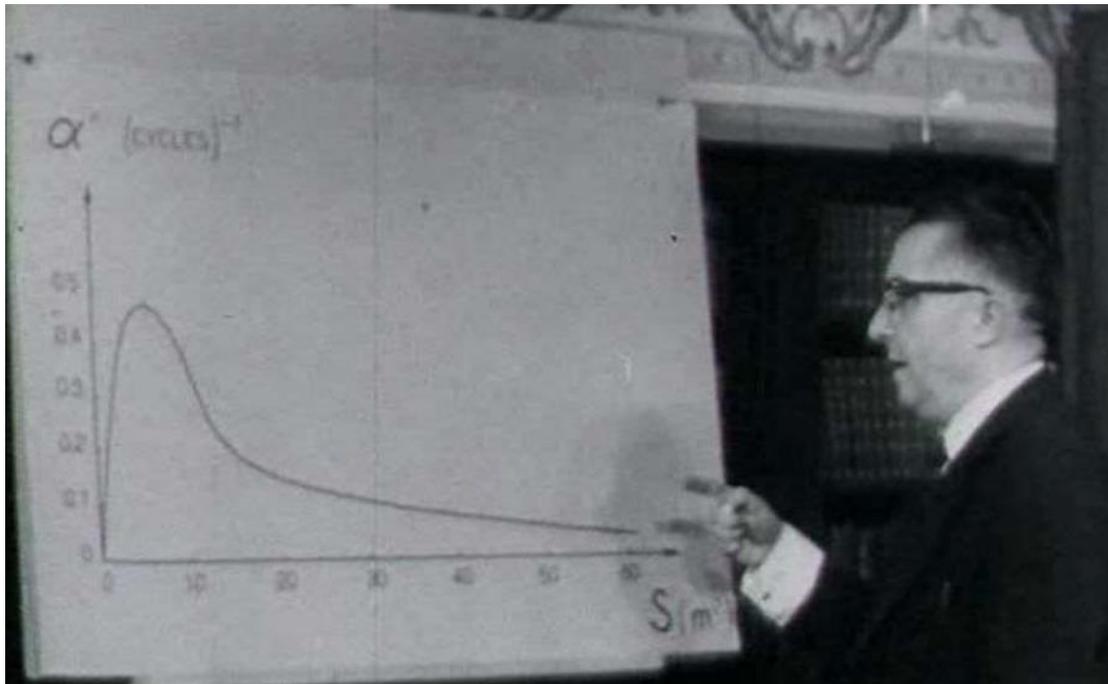
È importante inoltre riportare delle osservazioni riguardo i risultati ottenuti.

Per quando riguarda la seconda prova, infatti, sembrerebbe quasi che l'aria abbia un attrito interno superiore rispetto all'acciaio della molla. Si può notare che quando si alza il pistone sotto l'azione dell'aria e compie un lavoro. La domanda che ci si pone sono grazie a quale energia viene svolto questo lavoro?

Se non forniamo calore all'aria, deve per forza compierlo a spese della propria energia interna. Quindi la temperatura dell'aria contenuta nel cilindro deve diminuire. Ma se la temperatura dell'aria diminuisce fluirà del calore dalle pareti del cilindro che rimangono più calde all'aria, e questo è un fenomeno irreversibile. Per verificare l'ipotesi qui riportata abbiamo eseguito diverse prove.

<p>Prima prova</p>	
<p>Seconda prova</p>	
<p>Terza prova</p>	
<p>Quarta prova</p>	
<p>Quinta prova</p>	
<p>Sesta prova</p>	

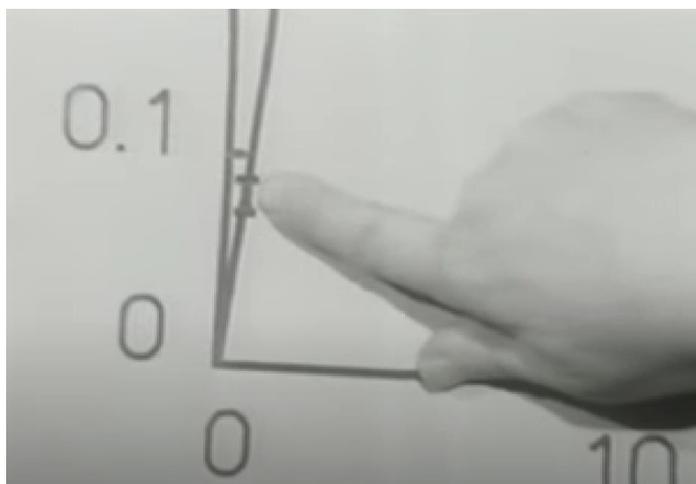
Eliminando gli effetti dell'attrito meccanico ricavato con la prima prova ecco il grafico che presente il coefficiente di smorzamento con la superficie dello scambiatore. I punti sono stati interpolati in una curva . Essa ha una forma come in figura :

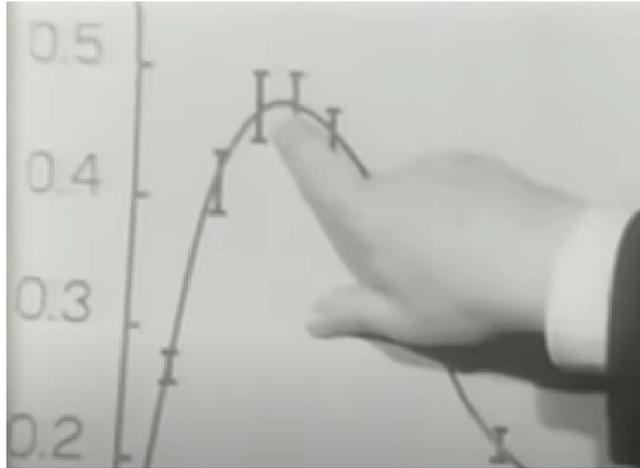


In ordinate è riportato il coefficiente di smorzamento già corretto (a cui è già stato sottratto l'effetto degli attriti meccanici). In ascisse la superficie dello scambiatore di calore.

Osservando l'immagine sottostante,

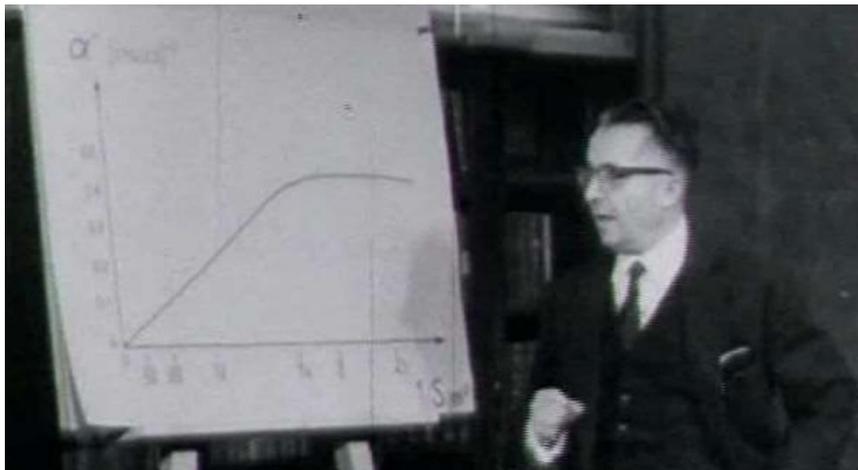
Notiamo che la curva passa per l'origine che corrisponde ad una superficie dello scambiatore nulla e ad uno smorzamento nullo. Questa condizione equivale ad uno scambio di calore nullo. È una trasformazione reversibile in cui l'aria è in equilibrio durante le oscillazioni. Questa affermazione vale solo per le lente oscillazioni (è per questo motivo che abbiamo usato un pendolo inverso). Le trasformazioni che avvengono senza scambio di calore sono chiamate adiabatiche. Per avere una trasformazione reversibile abbiamo ricavato la prima condizione necessaria





Questo il punto corrispondente al primo scambiatore di calore

La trasformazione reversibile del punto dell'origine prende il nome di ADIABATICA, ma se noi osserviamo il grafico, pare che anche per le grandi superfici il coefficiente di smorzamento tenda a 0. Per poter studiare meglio ciò che avviene nelle grandi superfici, è stato graficato il coefficiente di smorzamento in funzione dell'inverso della superficie. Come si può notare, anche questo grafico passa per l'origine.

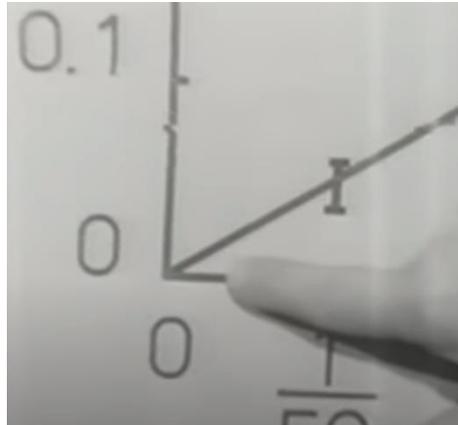


In questo caso l'origine rappresenta il caso di superfici infinite quindi la trasformazione in quel punto è reversibile.

Per ben comprendere il significato di trasformazione reversibile e irreversibile è importante notare che:

- Nella trasformazione IRREVERSIBILE il calore  $Q$  passa da un corpo con temperatura  $T_1$  ad un altro corpo con temperatura  $T_2$  se  $T_1$  è maggiore di  $T_2$ . Se invece  $T_2 > T_1$  allora il calore cambia verso .
- Nelle trasformazioni REVERSIBILI ho un passaggio di calore che può cambiare segno se la differenza  $\Delta T$  è infinitesimale.

Il grafico passa per l'origine, quindi nel caso di  $\Delta T = 0$  e superfici dello scambiatore infinite la trasformazione è REVERSIBILE: la temperatura del gas non varia durante le oscillazioni se la superficie dello scambiatore è infinita. Le trasformazioni che avvengono a temperatura costante vengono chiamate isoterme.



### **Conclusioni**

L'esperienza da noi vissuta ci ha permesso di comprendere nel materiale quali siano le conseguenze del secondo principio della termodinamica.

L'esperimento ci ha portato a trovare due trasformazioni reversibili:

- la trasformazione ADIABATICA in cui non avviene lo scambio di calore;
- la trasformazione ISOTERMA in cui non abbiamo un salto di temperatura.

Siamo stati anche in grado di comprendere le cause per cui queste avvengono e perché in natura non possono essere possibili. Nella realtà, infatti, le trasformazioni sono di carattere irreversibile.

Il filmato e l'esperimento ci hanno inoltre permesso di comprendere a fondo il concetto di entropia, probabilità termodinamica e le conseguenze dell'enunciato probabilistico descritti nella premessa teorica.

Possiamo infine dedurre che, a causa delle deduzioni dovute alle conseguenze del quarto enunciato del secondo principio della termodinamica (l'enunciato probabilistico), le leggi della fisica, in particolare quelle della termodinamica, andrebbero riscritte. Queste non vanno infatti introdotte con "è impossibile realizzare", ma bensì con "è estremamente improbabile realizzare".