**ENERGIA INTERNA**

****

In questi brevi appunti approfondirò alcuni aspetti dell’**Energia Interna** (**E**) che finora abbiamo soltanto descritto.[[1]](#footnote-1)

**ESISTE L’ENERGIA INTERNA?**

In altri appunti1 abbiamo detto che l’Energia Interna si ottiene estendendo il concetto di Potenziale a tutto il Lavoro, sia quello non dissipato che a quello dissipato. Così facendo, come abbiamo già dimostrato1, otteniamo l’equazione:

**Δ****E = Q-L = -(L-Q) (1) - Energia Interna (produce sia Lavoro che calore)**

**l’Energia Interna è un Potenziale la cui variazione si manifesta sia in Lavoro (e dunque in variazione di energia cinetica) sia in calore**

L’eq. (1) però ha in sé un problema: essa non dimostra che l’Energia Interna esiste ma piuttosto dimostra che se l’Energia interna esiste allora essa ubbidisce all’eq. (1). Questa affermazione è già stata scritta in altri appunti1 ed è stata discussa in classe dove, riguardo ad essa SICURAMENTE avete preso adeguati appunti.

Adesso bisogna fare la verifica fondamentale, cioè bisogna scoprire se l’Energia Interna esiste veramente o no. Ed in Fisica esiste un’unica procedura per verificare se una proprietà è vera o no: **bisogna fare degli esperimenti e vedere se essi confermano ciò che cerchiamo.** Nel nostro caso: bisogna eseguire delle misure e vedere se esse confermano o noi l’esistenza della grandezza E.

**Come si fa a verificare se l’Energia Interna esiste?**

“Prof, e quale esperimento possiamo fare? Cosa ci inventiamo?” “Vediamo, vediamo… fammi pensare… -il Prof pensa e ripensa- Dobbiamo sfruttare le proprietà che già conosciamo del Potenziale!”

Ecco il lampo di genio: **se l’Energia Interna esiste allora essa è un Potenziale e perciò deve sottostare a tutte le leggi matematiche del Potenziale**! Infatti, che una grandezza sia un Potenziale Meccanico o che sia un Potenziale Termico o che sia un Potenziale di qualsiasi altra cosa… per la Matematica non fa nessuna differenza, sempre e solo Potenziale è! La Matematica, come già detto tantissime volte, tratta tutte le grandezze allo stesso modo purché esse obbediscano alle medesime leggi matematiche. E noi sappiamo già quali sono le leggi matematiche del Potenziale Meccanico U!

* **Il Potenziale U è legato alla grandezza L (Lavoro) dalla relazione:**Δ**U = -L**

Per U valgono due proprietà fondamentali:

* **il potenziale U è sempre definibile se e solo se il valore del Lavoro L fra due punti non dipende dal cammino**
* **il potenziale U è sempre definibile se e solo se la circuitazione di L lungo un cammino chiuso è nulla**

Io so che, se esiste, per il Potenziale E vale l’eq. (1) e dunque posso scrivere subito:

* **Il Potenziale** E **è legato alla grandezza L-Q dalla relazione:** ΔE **= -(L-Q)**

Ma allora io posso ottenere le proprietà del Potenziale all’Energia Interna semplicemente sostituendo E → U , (L-Q) → L !!! (Come mai è possibili fare ciò? Cheeee?!?! Non lo saiii???!!! Lo abbiamo ripetuto millanta volte a lezione! Corri subito a rileggerti i tuoi appunti, sfaticato!). Arrivo a concludere che:

* **il potenziale** E **è sempre definibile se e solo** **se** **il valore di (L-Q) fra due punti non dipende dal particolare cammino eseguito**
* **il potenziale** E **è sempre definibile se e solo se la circuitazione di (L-Q) lungo un cammino chiuso è nulla**

**Il valore di (L-Q) dipende dal particolare cammino eseguito?**

Adesso non ci resta che eseguire degli esperimenti per verificare l’esistenza di E. Il primo esperimento da fare è quello di verificare se il valore di (L-Q) fra due punti non dipende dal particolare cammino eseguito. Per fare la verificatrasformeremo un gas, portandolo da uno Stato iniziale (i) ad uno Stato finale (f), eseguendo la trasformazione (i) → (f) in due modi completamente diversi: per entrambe le trasformazioni misureremo il Lavoro L ed il calore Q e verificheremo se il valore (L-Q) risulta uguale o cambia al cambiare della trasformazione.

* se il valore L-Q risulta lo stesso per entrambe le trasformazioni (i) → (f) allora questa è una conferma del fatto che il valore di (L-Q) fra i due punti (i) e (f) non dipende dal cammino e perciò è una conferma che il potenziale *E* esiste.
* se invece il valore (L-Q) delle due trasformazioni (i) → (f) è diverso fra loro allora ciò dimostra che il valore di (L-Q) fra i due punti (i) e (f) dipende dal particolare cammino eseguito e perciò dimostra che il potenziale *E* non esiste.

Al riguardo abbiamo fatto un esperimento virtuale usando l’applet sul sito “FISICA FACILE” “[le 4 trasformazioni termodinamiche fondamentali](http://www.claudiocancelli.it/web_education/fisica/isobar,therm,vol,adia%20process.swf)”.

Come stato iniziale (i) abbiamo considerato un cilindro di gas alla pressione/volume/temperatura di:

Pi=2,5⋅106 Pa ; Vi=1,00⋅10-3 m3 ; Ti=300K.

Come stato finale (f) abbiamo preso lo stesso cilindro di gas ma con:

Pf=20,8⋅106 Pa ; Vf=0,12⋅10-3 m3 ; Tf=300K

**1a trasformazione: (i) → (f) isoterma.**

Comprimo il gas da (i) ad (f) in modo che la temperatura rimanga sempre costante (trasformazione **isoterma**): in altre parole, comprimo il gas in modo che quando si riscalda a causa della compressione il calore prodotto si disperda nell’ambiente lasciando la temperatura costante. Eseguendo le misure otteniamo: **L=5281J** (determinato dall’applet) , **Q=-1000cal** (calcolate dal Prof) [il “-“ per il Lavoro è dovuto al fatto che il Lavoro è ha fornito energia al Sistema comprimendo il gas mentre il “-“ per il calore è dovuto al fatto che esso è uscito dal Sistema].

In conclusione: L-Q = -5281J –(-1000cal) = -5281 + 1000cal → (1cal = 4,186J) →

**L-Q = -1095J (isoterma)**

**2a trasformazione: (i) → (f) isovolumica+isobara.** Adesso eseguo la trasformazione (i) → (f) in due passi: prima riscaldo il gas mantenendo il volume costante fino a che la pressione giunge al valore Pf=20,8⋅106Pa (trasformazione **isovolumica**); dopodiché comprimo il gas mantenendo la pressione costante finché il volume giunge al valore Vf=0,12⋅10-3 m3 (trasformazione **isobara**). Vediamo cosa accade:

I passo: isovolumica. Riscaldo il gas senza cambiargli di volume: via via che diventa sempre più caldo la sua pressione aumenta fino a giungere al valore Pf. Il calore assorbito dal gas è **Q=+2000cal** (calcolato dal Prof). Il Lavoro che eseguo è nullo: **L=0J.**

II passo: isobara. Adesso comprimo il gas fino a raggiungere il volume Vf mantenendo la pressione costante: per comprimere un gas senza che la pressione aumenti devo raffreddarlo e perciò disperdo il calore in eccesso. Alla fine ottengo: **L=-18.200J** (calcolato dall’applet); **Q=-6.086cal** (calcolato dal Prof).

Calcolo L-Q per tutta la trasformazione:

L-Q = (L-Q)ISOVOLUMICA+(L-Q)ISOBARA = (0J–2000cal) + [-18.200J – (-6086)cal] = -18.200J +4086cal → (1cal = 4,186J) → **L-Q=1096J (isovolumica + isobara)**

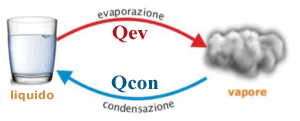
**Il valore di L-Q per le due diverse trasformazioni è identico entro gli errori!** I**l valore L-Q fra i due stati (i) → (f) non dipende dalla particolare trasformazione eseguita e ciò conferma che l’Energia Interna è un Potenziale che esiste realmente.**

Tutti gli esperimenti fatti al riguardo nei diversi Laboratori del mondo hanno sempre confermato che il valore L-Q ottenuto in una trasformazione fra due stati (i) → (f) non cambia mai al cambiare della particolare trasformazione.

**Il valore di (L-Q) è nullo in una trasformazione ciclica?**

Adesso non ci resta che eseguire degli esperimenti per verificare la seconda proprietà di E, cioè che “la circuitazione di (L-Q) lungo un cammino chiuso è nulla, ovvero che il valore (L-Q) calcolato lungo un percorso chiuso è zero.”

Per fare la verificatrasformeremo un gas, portandolo da uno Stato iniziale (i) ad uno Stato finale (f) per poi riportarlo allo Stato iniziale (i). Misureremo il Lavoro L ed il calore Q e verificheremo se il valore (L-Q) alla fine della trasformazione è zero. Nota che in Termodinamica una trasformazione che ritorna al valore iniziale si chiama **trasformazione** **ciclica**: perciò posso riassumere il tutto dicendo: “adesso verificheremo che il valore L-Q in una trasformazione ciclica è nullo.”

Possiamo eseguire questa verifica sfruttando una trasformazione ciclica che già avete studiato a Scienze della Terra: l’**evaporazione** e la **condensazione** (Figura1).

**Figura 1**

Evaporazione. Per far evaporare la massa **M** di liquido è necessaria una certa quantità di calore **Qev**. Voi sapete già calcolare Qev grazie al **calore latente di evaporazione** (**Lev)**: Qev = Lev⋅M (per chi non se lo ricordasse: il calore latente di evaporazione Lev è la quantità di calore necessaria a far evaporare la massa unitaria di liquido). Il calore Qev si distribuisce sia come calore assorbito dal liquido per evaporare (Q0) sia come Lavoro necessario al vapore appena creatosi per espandersi nell’atmosfera (L0), cosicché posso scrivere: **Qev = L0-Q0**

Condensazione. Adesso ritrasformo il vapore appena ottenuto in liquido raffreddandolo. Il calore che sottraggo è Qcon. Anche per Qcon vale l’equazione: Qcon = Lcon⋅M, con **Lcon** il **calore latente di condensazione**. Qcon si distribuisce sia come calore sottratto al liquido (Q0’) che come Lavoro fatto dall’atmosfera sul vapore che si contrae diventando liquido (L0’), cosicché posso scrivere: **Qcon = L0’-Q0’**.

Calcoliamo adesso il valore L-Q scambiato dalla trasformazione ciclica evaporazione→liquefazione:

Adesso devo calcolare la differenza L-Q e vedere se, dopo tutto il ciclo evaporazione→liquefazione, il suo valore è nullo o no. Sommo i Lavori e i calori e poi calcolo L-Q:

L = L0+L0’ ; Q = (Q0+Q0’) → L-Q = L0+L0’ – (Q0+Q0’) → (aggiusto i termini) →

L-Q = L0-Q0 + L0’-Q0’ → (L0-Q0 = Qev ; L0’-Q0’ = Qcon) → **L - Q = Qev + Qcon (2)**

A questo punto bisogna ricordare una legge della Chimica: il Calore Latente di una trasformazione è uguale ed opposto al Calore Latente della trasformazione opposta. Il che vuol dire che Lev = -Lcon → Qev = -Qcon → **Qev + Qcon = 0**. Sostituendo nell’eq. (2) ottengo all’istante:

**L – Q = 0** **(per la trasformazione ciclica).**

**Il valore di L-Q per la trasformazione ciclica è nullo! Ciò conferma che l’Energia Interna è un Potenziale che esiste realmente.**

**Nelle Scienze è sempre necessario dare una conferma sperimentale, anche alle tesi dei teoremi!**

“Prof! Con la verifica che il valore di L-Q per la trasformazione ciclica è nullo abbiamo solo perso del tempo!” “Come mai, pargolo?” “Perché avevamo già verificato che il valore L-Q non dipende dal cammino: e abbiamo dimostrato un teorema – il teorema inverso del “Teorema di indipendenza del cammino” affermato negli appunti “FORZE CONSERVATIVE E NON CONSERVATIVE”- che se il valore di una grandezza non dipende dal cammino allora il valore della medesima grandezza calcolato lungo un percorso chiuso è nullo. Perciò sapevamo già che il valore L-Q per una trasformazione ciclica è zero: è la tesi del teorema!”

Giusta osservazione: è *apparentemente* inutile verificare con un esperimento qualcosa che un teorema dimostra attraverso rigorosi passaggi logici-matematici… ma gli scienziati non la pensano così! **E’ sempre necessario verificare con esperimenti ogni proprietà, anche se essa è la tesi di un teorema**! Non si sa mai: spesso la Natura è più intelligente di noi e crea situazioni che non possiamo prevedere. Avevamo dimostrato che un Potenziale può esistere solo con forze conservative… e poi abbiamo scoperto che, estendendo il concetto di energia anche al calore esistono Potenziali anche per situazioni non conservative! Solo una conferma sperimentale dà la certezza che ciò che abbiamo affermato è giusto, teorema o non teorema.

**Guardate un po’! Quattro bambini alle prese con un’importante verifica di una proprietà fisica!**

**Immagine che contiene laser

Descrizione generata automaticamenteENERGIA INTERNA E CONSERVAZIONE DELL’ENERGIA**

La nostra ricerca appare finita: abbiamo finalmente scoperto che l’Energia Interna esiste e che perciò possiamo applicare l’eq. (1): **ΔE = Q-L (1)**

Però, però… in realtà l’eq. (1) nasconde una importantissima proprietà: per trovarla, puntualizziamo per iscritto lo schema dei segni del Lavoro e del calore che abbiamo ripetuto tante volte in classe perché ci sarà utile negli esempi che verranno:

|  |  |
| --- | --- |
| Q = calore ricevuto dall’esterno → -Q = calore trasferito all’esterno | Schema dei segni del Lavoro e del calore |
| L = Lavoro trasferito all’esterno → -L = Lavoro ricevuto dall’esterno |

Dallo “Schema dei segni” segue subito che:

Q-L = Q + (-L) = (calore + Lavoro) ricevuto dall’esterno = Energia ricevuta dall’esterno

Oppure posso portare fuori un segno “-“ e scrivere:

Q-L = -(-Q+L) = -(calore + Lavoro) trasferito all’esterno = -Energia trasferita all’esterno

Sostituendo i valori di Q-L appena trovati posso scrivere l’eq. (1) come:

**ΔE = Q-L =** **Energia ricevuta dall’esterno (2a)** oppure

**ΔE = -(-Q+L) = -Energia trasferita all’esterno (2b)**

Nota che le eq. (2a) e (2b) non sono nuove equazioni ma rappresentano entrambe l’eq. (1) scritta a parole.

L’eq. (2a) dichiara che: “tutta l’Energia che un Sistema riceve dall’esterno va ad aumentare l’Energia Interna e viceversa.” L’eq. (2b) dichiara che: “tutta l’Energia che un Sistema trasferisce all’esterno va a diminuire l’Energia Interna e viceversa.” Considerando il tutto posso affermare:

**tutta l’Energia che ricevo dall’esterno come Lavoro e calore viene immagazzinata nel Potenziale E**

**tutta l’Energia che trasferisco all’esterno come Lavoro e calore viene estratta dal Potenziale E**

Possiamo dire la stessa cosa in modo più sbrigativo:

**l’Energia non si genera e non si distrugge mai ma si trasferisce dal Potenziale E all’esterno sotto forma di Lavoro e calore e viceversa**

Abbiamo discusso in classe di questa proprietà e siamo giunti alla conclusione che essa è un’ulteriore verifica della **Legge di Conservazione dell’Energia ~~Meccanica~~**. Cooosaaaa?!?! Non ti ricordi la discussioneeee!?!? Corri subito a ripassarti i tuoi appunti!

**Un semplice esempio di conservazione dell’Energia**

Per chi non avesse chiara la relazione fra Legge di Conservazione dell’Energia ed Energia Interna propongo due semplici esempi che dovrebbero chiarire la cosa.

Energia ricevuta dall’esterno → Energia Interna aumenta. Adesso poniamo che il pistone sia spinto contro il gas, comprimendolo: poniamo che il Lavoro abbia valore L=-1000J (L<0 perché è Lavoro che il gas riceve dal pistone che lo comprime). Poniamo anche che il gas assorba calore dall’esterno per un valore Q=+400J (Q>0 perché è calore ricevuto dall’esterno).

**Energia ricevuta dall’esterno = -1.400J**

**Guadagno di Energia Interna = +1400J**

**L’energia è passata dall’esterno all’Energia Interna**

Calcoliamo l’energia ricevuta dall’ambiente esterno: (Lavoro + calore) ricevuto dall’esterno = L-Q = -1000J – 400J = -1.400J.

Calcoliamo di quanto è cambiata l’Energia Interna del gas usando l’eq. (1) :

ΔE = Q-L = 400J – (-1000J) = +1400J.

In conclusione: l’esterno ha perso trasferendoli al gas 1.400J mentre l’Energia Interna del gas è aumentata di 1.400J. Perciò posso affermare che: tutta l’energia che l’esterno ha perso è stata presa dal Potenziale del gas: l’energia non si è distrutta ma dall’esterno è passata nell’Energia Interna.

Energia trasferita all’esterno → Energia Interna diminuisce. Supponiamo che un gas si espanda spingendo un pistone: così facendo accelera il pistone fornendogli Lavoro: poniamo che il Lavoro abbia valore L=+1000J (L>0 perché è Lavoro che il gas trasferisce all’esterno). Supponiamo anche che ci siano degli attriti i quali disperdono nell’ambiente esterno del calore: poniamo che il calore disperso abbia valore Q=-400J (Q<0 perché è calore ceduto all’esterno).

**Energia trasferita all’esterno = +1.400J**

**Perdita di Energia Interna = -1400J**

**L’energia è passata dall’Energia Interna all’esterno**

Calcoliamo l’energia traferita all’ambiente esterno con l’aiuto dello “Schema dei segni”: (Lavoro + calore) trasferiti all’esterno = L + (-Q) = 1000J – (-400J) = +1.400J

Calcoliamo di quanto è cambiata l’Energia Interna del gas usando l’eq. (1):

ΔE= Q-L = -400J - 1000J = -1400J.

In conclusione: l’esterno ha guadagnato 1.400J mentre l’Energia Interna è diminuita di 1.400J. Perciò posso affermare che: tutta l’energia che l’esterno ha guadagnato è stata persa dall’Energia Interna: l’energia non è apparsa dal nulla ma è passata dall’Energia Interna all’esterno.

Questi esempi confermano ciò che avevamo già scritto: “Tutta l’Energia che ricevo dall’esterno come Lavoro e calore viene immagazzinata nel Potenziale E ; tutta l’Energia che trasferisco all’esterno come Lavoro e calore viene estratta dal Potenziale E”.



Adesso è giunta l’ora di fissare i concetti essenziali di questi appunti.

**Lo scopo di questi appunti è determinare se l’Energia Interna E esiste o no**. Infatti, negli appunti “ENERGIA INTERNA (intro) e PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA” eravamo giunti alla conclusione che se esiste un Potenziale E che tiene conto sia del Lavoro che del calore, esso deve obbedire all’eq. **ΔE = Q-L = -(L-Q)** ma non avevamo appurato se il Potenziale E esisteva o no.

Per scoprire se il PotenzialeE esiste realmente lo abbiamo confrontato con il Potenziale U.

Per U vale la legge matematica: **ΔU = -L**

Per E vale la legge matematica: **ΔE = Q-L = -(L-Q)**

Poi abbiamo sfruttato il fatto che le proprietà della Matematica si applicano a tutte le grandezze che seguono le stesse leggi matematiche. Per il Potenziale U sappiamo già che:

* **il potenziale U è sempre definibile se e solo se il valore del Lavoro L fra due punti non dipende dal cammino ; il potenziale U è sempre definibile se e solo se la circuitazione di L lungo un cammino chiuso è nulla**

Per applicare le proprietà di U ad E abbiamo sostituito E→U , L-Q → L:

* **il potenziale E è sempre definibile se e solo se il valore di L-Q fra due punti non dipende dal cammino ; il potenziale E è sempre definibile se e solo se la circuitazione di L-Q lungo un cammino chiuso è nulla**

Abbiamo verificato che il valore di L-Q fra due punti non dipende dal cammino eseguendo due diverse trasformazioni di un gas dal punto iniziale (i) al punto finale (f): una trasformazione era **isoterma**, l’altra **isocora+isobara**. Abbiamo visualizzato le trasformazioni con all’applet “[le 4 trasformazioni termodinamiche fondamentali](http://www.claudiocancelli.it/web_education/fisica/isobar,therm,vol,adia%20process.swf)”. Per entrambe le trasformazioni abbiamo calcolato il Lavoro L ed il calore Q ed abbiamo verificato che i due valori L-Q erano uguale entro gli errori.

Dopodiché abbiamo verificato che il valore di (L-Q) lungo un percorso chiuso (**trasformazione ciclica**) è nullo sfruttando le proprietà dei calori latenti di vaporizzazione e condensazione.

**Entrambe le verifiche hanno portato a dire che il Potenziale E esiste realmente.**

Infine abbiamo messo per iscritto lo schema dei segni del Lavoro e del calore: grazie ad esso abbiamo scritto l’eq. (1) a parole e abbiamo ottenuto l’eq. (2a) e (2b): abbiamo commentato le eq. (2a) e (2b) ed abbiamo evidenziato il fatto che l’eq. (1) è una conferma del **Principio di Conservazione dell’Energia**. Al riguardo, abbiamo fatto due esempi: essi hanno confermato che l’energia trasferita all’esterno di un Sistema è ottenuta dall’Energia Interna del Sistema e viceversa. In classe è stata fatta una breve discussione che voi diligentemente avete riportato sui vostri appunti.

1. Negli appunti “ENERGIA INTERNA (intro) e PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA” [↑](#footnote-ref-1)