

---

## **Il Karlsruher Physikkurs: nuove correnti nell'insegnamento della fisica**



---

Michele D'Anna

Alta Scuola Pedagogica, Piazza San Francesco  
19, CH-6600 Locarno (Svizzera)

---

ABSTRACT: L'occasione per il presente intervento è rappresentata dal completamento della traduzione italiana del Karlsruher Physikkurs, il corso sviluppato dal gruppo di didattica della fisica dell'Università di Karlsruhe, guidato dal professor Friedrich Herrmann, e rivolto ai primi anni del secondario superiore<sup>1</sup>. Nel panorama delle proposte didattiche innovative presentate negli ultimi due decenni, questo corso si connota per alcune scelte di fondo particolarmente "radicali", frutto di un lavoro sistematico quanto profondo.

Il testo è pubblicato anche su "La Fisica nella Scuola, XL, 3 Supplemento, 2007".

PAROLE CHIAVE: Didattica della fisica.

## Introduzione

L'occasione per il presente intervento è rappresentata dal completamento della traduzione italiana del *Karlsruher Physikkurs* (KPK) [1], il corso sviluppato dal gruppo di didattica della fisica dell'Università di Karlsruhe, guidato dal professor Friedrich Herrmann, e rivolto ai primi anni del secondario superiore<sup>1</sup>. Nel panorama delle proposte didattiche innovative presentate negli ultimi due decenni, questo corso si connota per alcune scelte di fondo particolarmente "radicali", frutto di un lavoro sistematico quanto profondo.

Le caratteristiche principali, elencate anche nel sito del dipartimento, mettono in evidenza come questo particolare approccio si fondi su di una *ristrutturazione disciplinare* della fisica che tiene conto dei seguenti criteri: l'eliminazione dei "fardelli storici"<sup>2</sup>, l'utilizzo delle analogie, l'abbattimento delle barriere tra la fisica e le discipline scientifiche affini (chimica, biologia, informatica).

Specialmente questi ultimi due punti sono stati tra gli elementi che, in occasione dell'ultima riforma curricolare del liceo ticinese<sup>3</sup>, hanno reso particolarmente interessante l'approccio del KPK: vi era infatti la necessità di rifondare un *corso di base* di fisica, seguito da tutti gli studenti nei primi due anni del liceo, quindi per allievi di due anni più giovani rispetto alla situazione precedente, dotati ovviamente di un bagaglio matematico particolarmente ridotto e con una motivazione in generale scarsa. La struttura che stiamo cercando di sviluppare, non identica a quella del KPK, ma pur sempre basata sui suoi principi cardine, ha per obiettivo di proporre un corso compatto, semplice e attuale, in cui la parte sperimentale sia costantemente presente come aspetto fondante e che aiuti a superare la situazione "tradizionale" in cui la fisica scoraggia e intimidisce gli allievi. A questo proposito, l'utilizzo delle *analogie* ed un esplicito *coordinamento concettuale* tra fisica, chimica e biologia<sup>4</sup> rappresenta un sicuro aiuto, in quanto permette un reinvestimento ottimale di quanto precedentemente appreso.

Ovviamente questo intervento non è la sede per una presentazione sistematica di tutti i capitoli del corso: sulla base della mia personale esperienza di insegnamento, mi soffermerò piuttosto su alcuni degli aspetti che ritengo maggiormente significativi<sup>5</sup>. Inizialmente cercherò di delineare alcuni degli strumenti concettuali fondanti e in un secondo momento di presentare il ruolo dell'energia come principio regolatore. Attraverso una opportuna rappresentazione grafica cercherò poi di rendere esplicito il funzionamento del formalismo che sta

---

<sup>1</sup> È importante osservare che questo approccio può venir utilizzato anche per altri livelli di scolarità, dal settore medio a quello universitario. Parecchie esemplificazioni didattiche relative ai diversi ordini di scuola possono essere visionate o scaricate dal sito del dipartimento di didattica della Fisica dell'Università di Karlsruhe.

<sup>2</sup> A questo proposito è utile segnalare la rubrica *Altlasten der Physik* tenuta da anni da F. Herrmann assieme a G. Job sulla rivista didattica *Praxis der Naturwissenschaften/Physik*: mensilmente viene proposta l'analisi di un aspetto specifico, mettendone in evidenza l'origine, le manchevolezze e indicando possibili soluzioni alternative. Una sessantina di interventi sono raccolti in un libretto omonimo [2].

<sup>3</sup> Con la riforma essenzialmente si è passati da un'organizzazione a indirizzi curriculari definiti ad un modello a opzioni; per il settore delle discipline scientifiche ciò ha necessitato lo spostamento nei primi due anni del liceo del corso di base, nonché la perdita di un curriculum continuato sui quattro anni.

<sup>4</sup> Per quanto riguarda il progetto del Canton Ticino, esso si fonda sulla scelta di alcuni *organizzatori cognitivi* trasversali alle tre discipline e sull'elaborazione di quadri di riferimento comuni condivisi (conoscenze e competenze richieste agli studenti al termine del corso di base). In questo modo si evitano condizionamenti temporali o vincoli derivanti dalla propedeuticità di una disciplina rispetto ad altre: è invece richiesto di assicurare la coerenza con il modello generale condiviso in ogni singola azione didattica da parte tutte le discipline. Va da sé che i singoli contenuti disciplinari devono trovare una conveniente tematizzazione da parte di una o più discipline nei tempi e nei modi più opportuni. Una prima proposta è consegnata nel documento *L'energia nel corso di base delle scienze sperimentali del liceo: riflessioni e proposte* elaborato nella primavera 2003 dall'apposito Gruppo per il coordinamento degli insegnamenti di biologia, chimica e fisica e approvato dall'UIMS/DECS [3].

<sup>5</sup> Chi fosse interessato ad una presentazione del KPK direttamente per mano dell'autore veda ad esempio l'articolo di F. Herrmann *The Karlsruhe Physics Course* [4].

alla base dei processi che possono essere descritti in questo ambito e per finire darò una esemplificazione un po' più approfondita per quanto riguarda alcuni aspetti dell'insegnamento della termodinamica.

## 1. Alcuni strumenti concettuali

L'obiettivo di utilizzare le analogie, rispetto alla trattazione tradizionale, impone una riflessione particolare sulla scelta delle grandezze fisiche che vengono introdotte per la descrizione dei fenomeni naturali: si tratta in sostanza di riconoscere la possibilità di utilizzare nei vari campi di studio determinate coppie di grandezze, una con carattere estensivo, la sua coniugata con carattere intensivo. Le *grandezze estensive* si caratterizzano per alcune proprietà generali che le rendono particolarmente interessanti dal punto di vista del *modello descrittivo* cui soggiacciono: esse si riferiscono sempre ad una porzione di spazio ben definita e con esse si può operare come se si trattasse di una "sostanza" che può essere sia immagazzinata che trasferita. Le varie grandezze estensive sono soggette ad una legge di bilancio; a seconda delle situazioni, esse possono essere conservate o meno, ossia nei fenomeni che le vedono implicate risulterà applicabile o meno una legge di conservazione. Accanto ad esse un ruolo importante è ricoperto dalle *grandezze intensive*: formalmente esse rappresentano i potenziali generalizzati cui le varie grandezze estensive sono collegate. Dal punto di vista sperimentale sono riconoscibili per il ruolo particolare che esse hanno nei vari fenomeni: le grandezze estensive fluiscono spontaneamente da punti o regioni in cui il valore del potenziale è elevato a punti o regioni in cui il valore del potenziale è più basso. Ciò può essere espresso anche dicendo che le differenze di potenziale costituiscono una sorta di *forza motrice* o di "*spinta*" per il trasferimento delle grandezze estensive coniugate.

Questo semplice schema offre molte possibilità dal punto di vista sperimentale: ad esempio si possono considerare due recipienti cilindrici, contenenti acqua, collegati alla base da un tubicino provvisto di rubinetto e di un rilevatore di flusso. Variando le quantità dell'acqua contenuta inizialmente nei due recipienti nonché la loro sezione, è possibile identificare, rispettivamente nel volume d'acqua e nella pressione<sup>6</sup>, la coppia di grandezze estensiva ed intensiva che permettono una descrizione a livello fenomenologico del processo osservato (trasferimento di acqua fino al raggiungimento di una situazione di equilibrio). In particolare la *differenza di pressione* ai capi del collegamento viene riconosciuta come *causa* per il trasferimento di acqua da un recipiente all'altro. Parallelamente emergono la proprietà di conservazione del volume d'acqua, il concetto di intensità di corrente, nonché quello di resistenza al trasferimento sulla base di osservazioni qualitative sui fattori che influenzano la rapidità con cui esso avviene.

Ulteriori esempi possono essere costituiti dal contatto tra due oggetti carichi elettricamente, oppure da una serie di urti tra slitte poste su di un binario a cuscino d'aria: anche in queste situazioni si tratta di identificare e caratterizzare le varie grandezze fisiche che consentono una descrizione fenomenologica dei processi osservati<sup>7</sup>.

La tabella riportata sotto riassume il quadro dei concetti che possono venir introdotti attraverso un percorso di questo tipo:

---

<sup>6</sup> A questo momento il concetto di pressione viene introdotto come una grandezza primaria, caratterizzata dalle sue proprietà. Il legame quantitativo tra pressione, altezza del livello dell'acqua e densità del fluido impiegato viene costruito separatamente in un secondo tempo con una serie di esperienze mirate che portano alla legge di Stevino.

<sup>7</sup> L'analisi degli aspetti quantitativi in queste situazioni trova un ideale supporto nell'utilizzo di sistemi di acquisizione dati on-line: in questo modo si dispone anche di materiale sperimentale (in particolare grafici) che consente di ricavare a livello elementare alcune delle proprietà più importanti delle grandezze in gioco.

Campo di studio	Grandezza estensiva	Conservata / non conservata	Corrente associata	Grandezza intensiva	“Spinta” al trasferimento
Idraulica	Volume d'acqua $V$	conservata	Corrente d'acqua $I_V$	Pressione $P$	$\Delta P$
Elettricità	Carica elettrica $Q$	conservata	Corrente elettrica $I_Q$	Potenziale elettrico $\varphi$	$\Delta \varphi$
Meccanica (traslazioni)	Quantità di moto $p_x$	conservata	Corrente meccanica (traslazioni) $I_{p_x}$ (o forza $F$ )	Velocità $v_x$	$\Delta v_x$
Meccanica (rotazioni)	Quantità di moto angolare $L_x$	conservata	Corrente meccanica (rotazioni) $I_{L_x}$ (o momento della forza $M_{mecc}$ )	Velocità angolare $\omega_x$	$\Delta \omega_x$
Termologia	Entropia $S$	non conservata	Corrente d'entropia $I_S$	Temperatura assoluta $T$	$\Delta T$
Chimica (trasformazioni della materia)	Quantità di sostanza $n$	non conservata	Corrente chimica (o di quantità di sostanza) $I_n$	Potenziale chimico $\mu$	$\Delta \mu$

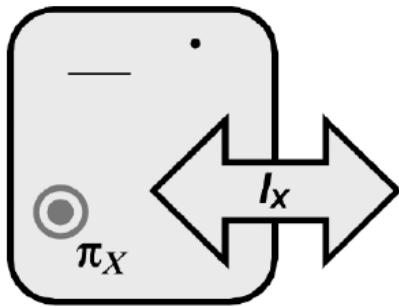
**Tabella 1.** Per ciascun campo di studio vengono indicate di volta in volta le grandezze estensive e intensive che lo caratterizzano, se si tratta di una grandezza conservata o meno, nonché la quantità che funge da “spinta” per il trasferimento della grandezza estensiva.

Per la descrizione sia qualitativa che quantitativa dei fenomeni osservati, uno strumento molto potente è costituito dalla cosiddetta *equazione di bilancio*<sup>8</sup>. Essa permette di collegare tra loro la variazione temporale della grandezza estensiva considerata e le due possibili modalità attraverso le quali questa variazione può realizzarsi: scambi con l'esterno e produzione e/o annichilamento all'interno della regione considerata (figura 1). In simboli, per ogni grandezza estensiva (qui indicata genericamente con  $X$ ) è infatti possibile scrivere una relazione della forma:

$$\frac{dX}{dt} \equiv \dot{X} = I_X + \pi_X$$

I due termini della relazione di bilancio,  $I_X$  e  $\pi_X$ , descrivono le due modalità secondo le quali la grandezza estensiva  $X$  può variare all'interno del sistema considerato: da un lato gli scambi con l'esterno sono descritti dalle *correnti* associate alla grandezza  $X$ ,  $I_X$ , che possono sia entrare che uscire dal sistema, mentre produzione e/o annichilamento sono descritti dal *tasso di produzione* (o di distruzione) di  $X$ ,  $\pi_X$ . I due contributi al bilancio globale si differenziano per un aspetto importante: le variazioni della grandezza  $X$  dovute a fenomeni di trasporto ( $I_X$ ) coinvolgono sempre sia l'interno che l'esterno della regione di spazio considerata e devono quindi essere

<sup>8</sup> Quella qui presentata è la cosiddetta *forma istantanea* dell'equazione di bilancio, quella cioè che, istante per istante, dà informazioni su cosa sta avvenendo *con e nel* sistema; ovviamente, dal punto di vista didattico, all'inizio può risultare più facile utilizzare la cosiddetta forma integrata, quella cioè che si riferisce ad intervallo di tempo finito.



**Figura 1.** Gli elementi costitutivi della legge di bilancio: la variazione istantanea della grandezza estensiva considerata ( $X$ ) all'interno della regione di spazio presa in esame dipende sia dall'intensità della corrente associata agli scambi con l'esterno ( $I_X$ ), sia dal tasso di produzione interna ( $\pi_X$ ).

contabilizzate sia nel bilancio relativo all'interno del sistema che in quello relativo all'ambiente circostante. Differente invece la situazione per quanto attiene ai tassi di produzione/distruzione ( $\pi_x$ ): variazioni che rientrano in questa categoria sono contabilizzate *unicamente* all'interno del sistema, senza che all'esterno vi sia una controparte.

## 2. Il ruolo dell'energia

Finora non abbiamo fatto nessun riferimento agli aspetti energetici. La ragione sta nel fatto che abbiamo

considerato "singoli" processi, anzi, a meglio dire, processi "dimezzati". In realtà quando una grandezza estensiva subisce una "caduta" (di potenziale), vi è sempre la possibilità che una seconda grandezza estensiva venga "elevata" ad un valore più alto del rispettivo potenziale. I dispositivi tecnologici preposti a questo scopo vengono a ragione chiamati "pompe": così ad esempio abbiamo la pompa per l'acqua oppure la pompa di calore, il generatore a manovella, la cella elettrochimica, ecc. Anche in natura si osserva una straordinaria varietà di modalità per realizzare "accoppiamenti" di questo genere: si potrebbe quasi dire che il fatto saliente di un processo consiste nella capacità di creare una differenza "utile" impiegando una differenza "a disposizione". O in altre parole, che generalmente un processo ne "tira" un altro. Così ad esempio avviene per il cosiddetto ciclo dell'acqua, oppure nel caso della fotosintesi, della respirazione cellulare o in generale nei processi biochimici che coinvolgono l'idrolisi dell'ATP.

Da questo punto di vista, la domanda interessante diventa quindi: da che cosa sono "regolati" questi accoppiamenti? In base a quale principio certi fatti avvengono (e proprio con quelle modalità) ed altri no? Come sappiamo, la "contabilità" in questo ambito è svolta dall'*energia*, che ha quindi il ruolo di principio regolatore: in una data situazione, l'energia determina i tassi di accoppiamento tra i vari aspetti (meccanici, termici, elettrici, idraulici, chimici, ecc.) coinvolti nel processo considerato. Come vedremo meglio nel seguito, può anche succedere che in un dato processo l'accoppiamento non possa essere realizzato in maniera "ideale" o risulti addirittura impossibile: allora, invariabilmente, vi è produzione di entropia e il processo in questione si rivela essere irreversibile. Tali processi vengono chiamati processi dissipativi.

Come introdurre quindi l'energia nell'ottica sopra delineata? Ovviamente in *questa* prospettiva l'approccio tradizionale risulta poco efficace; più adatto risulta caratterizzare l'energia attraverso le sue proprietà, che risultano essere quelle di una grandezza estensiva. L'energia infatti:

- può essere immagazzinata;
- può essere trasferita da un sistema ad un altro;
- nei trasferimenti è sempre associata ad un'altra grandezza estensiva (che per questa ragione viene spesso indicata come *portatore* dell'energia);
- può essere trasferita da un portatore ad un altro;
- è soggetta ad una legge di bilancio;
- è una grandezza conservata.

Affinché questo *modello* permetta una rilettura quantitativa di tutte le situazioni sperimentali incontrate, è necessario quantificare il rapporto tra l'energia ed il suo portatore, e precisamente per quanto riguarda i trasferimenti di energia. In questo intervento ci soffermeremo particolare sulla *potenza*, ossia sulla quantità di energia che per unità di tempo viene richiesta e/o messa a disposizione in un determinato processo. Per i processi (di conduzione) dovuti ad una differenza di potenziale<sup>9</sup> si trova *sperimentalmente* che la potenza può essere espressa con una relazione del tipo<sup>10</sup>:

$$\mathcal{P} = I_X \cdot \Delta\varphi_X$$

L'idea è quella di realizzare un *medesimo effetto* attraverso *modalità differenti*. Così ad esempio nel caso idraulico si può utilizzare una turbina ad acqua, che consenta una regolazione indipendente dell'intensità della corrente e della differenza di pressione. Allora, collegandola per esempio ad una dinamo che alimenta una lampadina, si osserva che la luce prodotta da quest'ultima può avere una *determinata* intensità per regolazioni *diverse*, ma che nelle varie situazioni il prodotto tra l'intensità della corrente d'acqua e la differenza di pressione risulta costante.

La tabella riportata qui di seguito illustra la situazione nei vari campi di studio, mettendo in risalto le analogie:

Campo di studio	Grandezza estensiva	Grandezza intensiva	Corrente associata	Trasporto di energia	Scambi di energia
Idraulica	Volume d'acqua $V$	Pressione $P$	Corrente d'acqua $I_V$	$I_E = I_V \cdot P$	$\mathcal{P} = I_V \cdot \Delta P$
Elettricità	Carica elettrica $Q$	Potenziale elettrico $\varphi$	Corrente elettrica $I_Q$	$I_E = I_Q \cdot \varphi$	$\mathcal{P} = I_Q \cdot \Delta \varphi$
Meccanica (traslazioni)	Quantità di moto $p_x$	Velocità $v_x$	Corrente meccanica (traslazioni) $I_{p_x}$ (o forza $F$ )	$I_E = I_{p_x} \cdot v_x$	$\mathcal{P} = I_{p_x} \cdot \Delta v_x$
Meccanica (rotazioni)	Quantità di moto angolare $L_x$	Velocità angolare $\omega_x$	Corrente meccanica (rotazioni) $I_{L_x}$ (o momento della forza $M_{meca}$ )	$I_E = I_{L_x} \cdot \omega_x$	$\mathcal{P} = I_{L_x} \cdot \Delta \omega_x$
Termologia	Entropia $S$	Temperatura assoluta $T$	Corrente d'entropia $I_S$	$I_E = I_S \cdot T$	$\mathcal{P} = I_S \cdot \Delta T$
Chimica	Quantità di sostanza $n$	Potenziale chimico $\mu$	Corrente chimica (o di quantità di sostanza) $I_n$	$I_E = I_n \cdot \mu$	$\mathcal{P} = I_n \cdot \Delta \mu$

**Tabella 2.** Aspetti energetici: oltre alle grandezze estensive e intensive caratteristiche per ciascun campo viene indicata la loro relazione con gli aspetti energetici.

<sup>9</sup> Più precisamente si tratta di quei processi in cui la differenza di potenziale rappresenta la *spinta motrice* per la corrente della grandezza estensiva coniugata. Per altre situazioni la relazione quantitativa può assumere altre forme.

<sup>10</sup> Una illustrazione esplicita delle situazioni sperimentali che portano a questa relazione nel caso *idraulico* ed *elettrico* era stata da me presentata nella comunicazione al XLI° congresso AIF 2002 di Casarano *Il gioco delle analogie e il ruolo dell'energia*. In essa erano pure state illustrate le situazioni sperimentali utilizzate per ricavare le espressioni per l'energia cinetica immagazzinata in un corpo in movimento e per l'energia immagazzinata in un condensatore.

Le ultime due colonne della tabella mettono in evidenza i due differenti aspetti di *trasporto* e di *scambio* di energia: il portatore può essere più o meno *caricato* di energia, ma ciò che interviene direttamente nei processi è unicamente la differenza tra il livello in entrata e quello in uscita. Dal punto di vista della formalizzazione, nel primo caso si può parlare di *energia trasportata* dal portatore e di intensità dell'energia trasportata  $I_E$ ; nel secondo caso di *energia scambiata* e, come già abbiamo visto, di potenza  $\mathcal{P}$ . Quest'ultima è quindi interpretabile anche come la quantità di energia che, istante per istante, nel processo considerato, cambia di portatore.

Con queste definizioni, è facile verificare che la potenza può essere espressa come la differenza tra le intensità della corrente d'energia in entrata e in uscita:

$$\mathcal{P} = I_{E,in} - I_{E,out}$$

e che quindi l'intensità della corrente dell'energia trasportata  $I_E$  può essere espressa da:

$$I_{E,in} = I_x \cdot \varphi_{X,in}$$

$$I_{E,out} = I_x \cdot \varphi_{X,out}$$

Infatti:

$$\mathcal{P} = I_x \cdot \Delta\varphi_X = I_x \cdot (\varphi_{X,in} - \varphi_{X,out}) = I_{E,in} - I_{E,out} .$$

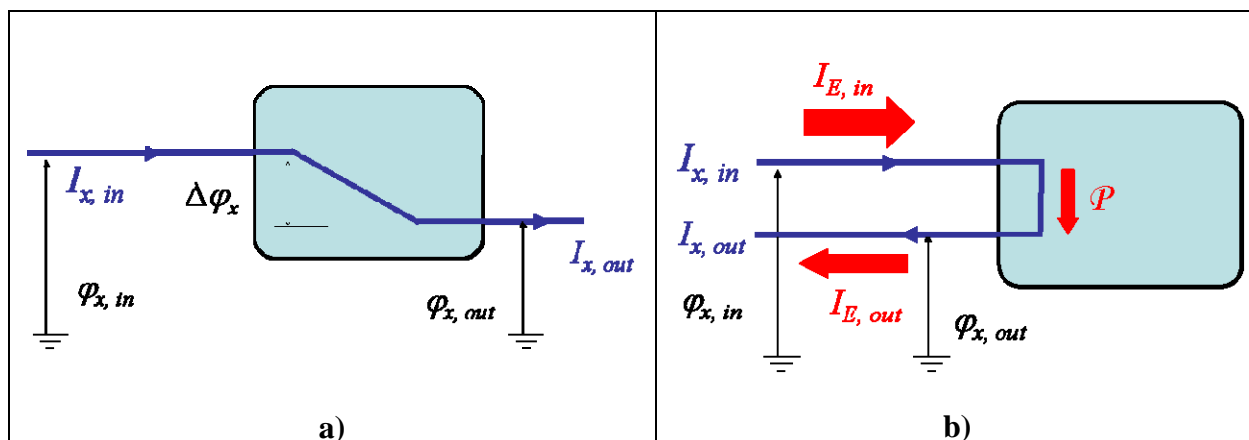
### 3. Una utile rappresentazione grafica

Nelle due sezioni precedenti abbiamo costruito un primo livello di uno strumento concettuale che permette di interpretare una gran varietà di fenomeni naturali e che consente di fare previsioni, almeno qualitative, sull'evoluzione temporale dei sistemi considerati. Per una descrizione più completa e quantitativa, occorre conoscere in modo esplicito *come* le varie grandezze estensive possono essere immagazzinate e trasferite: in altre parole, si tratta di aggiungere le leggi costitutive di tipo *capacitivo* e *conduttivo* che regolano rispettivamente i sistemi considerati e gli scambi fra di essi. Queste relazioni richiedono in generale l'introduzione esplicita dei concetti di *capacità* e di *resistenza* specifici dei vari ambiti. Con ciò verrebbe ampliato in modo significativo il quadro di riferimento per la descrizione dei fenomeni naturali incentrato sui concetti di equazione di bilancio, spinte, correnti e resistenze, nonché sul ruolo dell'energia, in modo da favorire e stimolare il coordinamento fra le discipline.

Limitandoci al livello introduttivo fin qui delineato, vogliamo ora aggiungere una rappresentazione grafica che si rivela di grande utilità sia nell'analisi qualitativa delle diverse situazioni che nell'impostazione di quella quantitativa. La rappresentazione proposta cerca di mettere in evidenza i seguenti elementi:

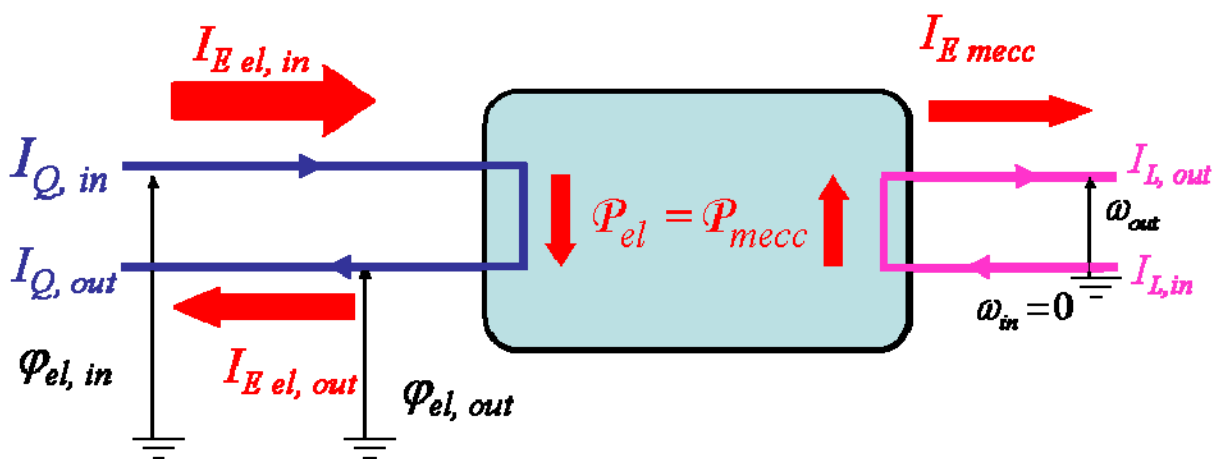
- il *sistema* di cui si vuol indagare il comportamento (rappresentato da un "rettangolo");
- gli *scambi* delle grandezze estensive con l'esterno (linee continuate e orientate);
- indicazioni sui *valori dei potenziali* in gioco;
- gli *aspetti energetici* (freccie), distinguendo tra gli scambi con l'esterno (intensità delle correnti di energia), l'energia che viene rilasciata o caricata nel processo (potenza) nonché quella che, se del caso, viene coinvolta nei processi dissipativi con produzione di entropia.

Qui di seguito una prima parziale schematizzazione, che presenta questi elementi essenziali:



**Figura 2.** Verso la rappresentazione schematica di un processo che coinvolge un determinato sistema: a) la grandezza estensiva ( $X$ ) fluisce attraverso il sistema considerato. La differenza di potenziale  $\Delta\varphi_x$  funge da “spinta” al trasferimento: il valore del potenziale in uscita è inferiore a quello in entrata, mentre l’intensità della corrente in entrata è uguale a quella in uscita (grandezza conservata). b) stessa situazione con l’aggiunta degli aspetti energetici: in particolare è messa in evidenza la potenza  $\mathcal{P}$ , che rappresenta l’energia per unità di tempo messa a disposizione nel processo. La conservazione dell’energia è espressa dalla relazione  $\mathcal{P} = I_{E, in} - I_{E, out}$ .

Quale esempio di processo in cui vi è un trasferimento di energia da un portatore ad un altro consideriamo un motore elettrico (v. figure 3): limitandoci al caso ideale - ossia al caso in cui non vi è produzione di entropia - possiamo schematizzare il processo come il passaggio di energia dal portatore in entrata (carica elettrica) a quello in uscita (quantità di moto angolare). Possiamo anche leggere la situazione come un esempio in cui una differenza di potenziale ne crea un’altra: l’energia fluisce attraverso il dispositivo cambiando portatore.



**Figura 3.** Rappresentazione schematica di un processo: motore elettrico (ideale). L’energia che si rende disponibile nel processo passa dal portatore “carica elettrica” al portatore “momento angolare”.

#### 4. Termodinamica: con l’entropia sin dall’inizio!

In questa ultima sezione, come detto, desidero affrontare brevemente il tema dell’insegnamento della termodinamica: ovviamente in una chiave coerente con quanto discusso fino ad ora, in particolare per quanto

riguarda l'interpretazione dei fenomeni termici sulla base di una *specific*a grandezza estensiva, l'*entropia* appunto, e della relativa grandezza intensiva, la *temperatura*.

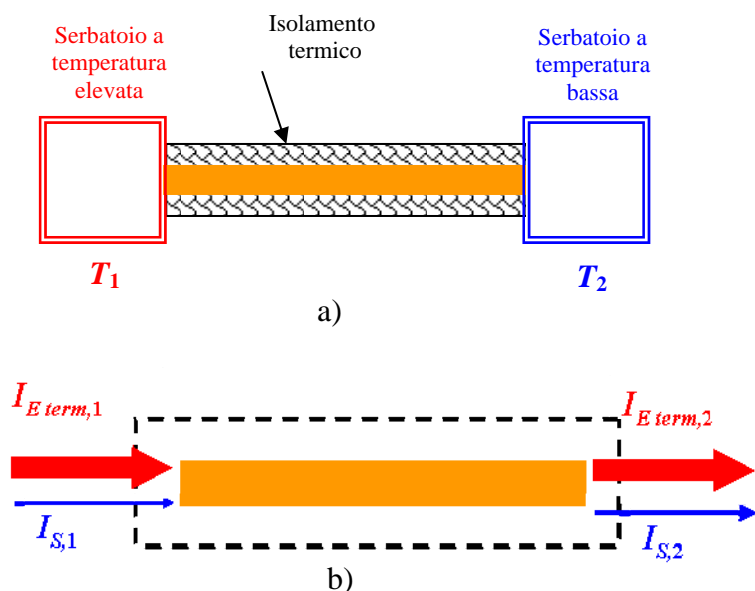
L'entropia viene introdotta come grandezza primaria e pertanto è presente sin dalla prima lezione di termologia. Con una serie di considerazioni a partire da semplici situazioni sperimentali è possibile delineare le proprietà principali dell'entropia quale *grandezza estensiva*<sup>11</sup>, che:

- può essere immagazzinata;
- può fluire da un corpo ad un altro;
- è soggetta ad una legge di bilancio;
- *non* è una grandezza conservata: l'entropia può essere prodotta, ma non può *mai* essere distrutta;
- ha il ruolo di portatore dell'energia nei fenomeni termici.

Per quanto riguarda la temperatura, di particolare utilità è il mettere in rilievo sin dall'inizio il ruolo delle differenze di temperatura come *spinta* per il trasferimento di entropia. Così la temperatura (assoluta) assume il ruolo di *potenziale termico*: più elevata risulta essere la temperatura di un corpo, più entropia è in esso contenuta.

Grazie a questa prima fase, la descrizione dei fenomeni termici risulta essere coerentemente collegata con quella degli altri ambiti; dopo le *analogie*, su questa base è possibile presentare e mettere in evidenza anche le *particolarità* dell'entropia, e in primo luogo il fatto che l'entropia può essere prodotta (creata), ma non può mai essere distrutta (annichilata).

Per quanto riguarda la produzione, un esempio semplice ed efficace è costituito dalla conduzione termica lungo una sbarra metallica (v. figure 4): supponiamo di aver raggiunto uno stato stazionario in



**Figura 4** - Conduzione termica attraverso una sbarra metallica:

a) grazie all'isolamento termico del mantello, la sbarra metallica è in contatto termico unicamente con i due serbatoi di calore a temperatura  $T_1$  e  $T_2$ ;  
 b) raggiunto uno stato stazionario, le intensità della corrente d'energia in entrata ed in uscita hanno il medesimo valore. Dato che  $T_1 > T_2$ , ciò permette di concludere che dalla sbarra esce più entropia di quanta ne entra, ossia che nel processo di conduzione viene prodotta entropia: si tratta in effetti di un processo irreversibile.

la sbarra scambia entropia unicamente con i due termostati a temperatura costante  $T_1$  rispettivamente  $T_2$  (si suppone cioè che i due termostati abbiano una capacità termica infinita). Allora, la conservazione dell'energia e

<sup>11</sup> Per una descrizione dettagliata si vedano i capitoli da 10 a 12 del primo volume del KPK [1]. Negli atti del XLI Congresso AIF 2002 di Casarano si trova una trasposizione in forma teatrale: *Un Atto di Fisica o l'Entropia Giocosa* [5].

l'usuale relazione che lega le intensità delle correnti di energia e del suo portatore nei fenomeni conduttivi ci permettono di scrivere:

$$I_{Eterm,1} = I_{Eterm,2}$$

$$T_1 \cdot I_{S1} = T_2 \cdot I_{S2}$$

da cui, dato che la temperatura  $T_1$  è assunta essere (strettamente) maggiore della temperatura  $T_2$ , si ottiene immediatamente:

$$I_{S2} > I_{S1}$$

ossia: la quantità di entropia che (per unità di tempo) esce dalla sbarra è *maggiore* di quella che vi entra. Alla luce dell'*equazione di bilancio*, questo risultato ci dice che il fenomeno di conduzione termica tra due corpi a temperatura diversa è necessariamente accompagnato da una *produzione* di entropia:

$$I_{S2} = I_{S1} + \mathcal{P}_S.$$

L'analisi della conduzione termica può essere sfruttata per proporre una serie di osservazioni generalizzanti che portano diritte al cuore della termodinamica, in particolare per avvicinare lo studente allo stretto legame esistente tra *produzione di entropia*, *irreversibilità* del processo considerato e *secondo principio della termodinamica*:

1. in primo luogo occorre mettere l'accento sul fatto *l'entropia può essere prodotta ma non può mai essere distrutta*: questa affermazione costituisce infatti a tutti gli effetti una formulazione del secondo principio della termodinamica, particolarmente semplice e di immediata applicazione per il riconoscimento dei processi irreversibili.
2. Una seconda osservazione riguarda il fatto che la produzione di entropia è una caratteristica necessaria e sufficiente per determinare l'irreversibilità del processo considerato. Questo aspetto è particolarmente interessante, poiché nella grande varietà dei fenomeni dissipativi che ci circondano ve ne sono alcuni che sono facilmente caratterizzabili e riconoscibili. In particolare i seguenti fenomeni sono sempre accompagnati da produzione di entropia e risultano quindi irreversibili:
  - conduzione elettrica attraverso un metallo (dovuta a una differenza di potenziale elettrico);
  - conduzione termica (dovuta a una differenza di temperatura);
  - attriti meccanici (dovuti a una differenza di velocità tra i corpi a contatto);
  - reazioni chimiche (dovute a una differenza di potenziale chimico) non accoppiate, in particolare le combustioni<sup>12</sup>.
3. Un terzo aspetto che vale la pena di sottolineare è il fatto che dal punto di vista energetico, la produzione di entropia ha sempre un "costo"; in un processo dissipativo una parte dell'energia del sistema viene "legata" all'entropia prodotta e non è quindi più disponibile per essere sfruttata per altri fini. Quantitativamente si ha:

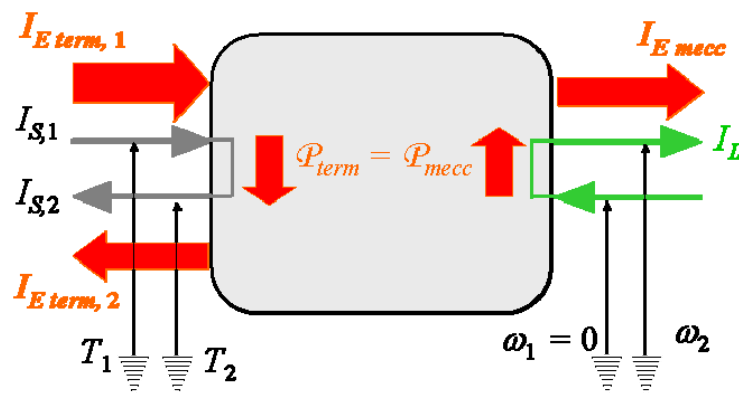
$$\mathcal{D}_{term} = T \cdot \mathcal{P}_S$$

<sup>12</sup> La possibilità di un collegamento esplicito con altri aspetti delle scienze sperimentali mi sembra particolarmente significativo; conformemente al desiderio di apertura enunciato negli intenti iniziali, nel KPK un capitolo del terzo volume è dedicato al tema delle *reazioni chimiche*. Particolarmente interessante è l'introduzione esplicita – e sempre come grandezza fenomenologia primaria – del concetto di potenziale chimico, che a dispetto del nome trova innumerevoli applicazioni anche in ambiti che solitamente riconosciamo come appartenenti alla fisica. Per una introduzione si veda anche G. Job *Das chemische Potential im Physik- und Chemie-Elementarunterricht* [6] o anche M. D'Anna et al. *Il potenziale chimico: potenzialità didattiche di una grandezza poco conosciuta ma di grande utilità* [7].

dove  $\mathcal{D}_{term}$  rappresenta il tasso di dissipazione dell'energia, mentre  $T$  è la temperatura alla quale l'entropia viene prodotta. Questo risultato permette di puntualizzare un aspetto concernente la *non conservazione* dell'entropia, talvolta indicata come un ostacolo rilevante legato all'introduzione del concetto stesso di entropia: se da una parte è vero che l'entropia può essere prodotta, d'altra parte questa produzione non è "libera", ma sottostà al principio della conservazione dell'energia che qui esprime appieno il suo ruolo di *principio regolatore* di validità generale. Si può perfino affermare che in ogni processo irreversibile viene prodotta esattamente tanta entropia quanta ne è richiesta dalla conservazione dell'energia<sup>13</sup>.

4. Le due precedenti osservazioni permettono anche di introdurre qualitativamente gli aspetti centrali delle *macchine termiche*<sup>14</sup>: per avere il rendimento massimo, occorre evitare processi con produzione di entropia, vale a dire occorre in particolare evitare qualsiasi processo in cui il fluido di lavoro entri in contatto con parti della macchina che si trovano ad una temperatura diversa dalla propria. Pensando ad una macchina termica che impiega gas ideale, questa condizione pone ovviamente severi vincoli, che riducono le trasformazioni utilizzabili alle isoterme e alle adiabatiche reversibili (o isoentropiche). Come si noterà facilmente, queste considerazioni ci portano direttamente ed in modo naturale a considerare il ben noto ciclo di Carnot<sup>15</sup>.

Per quanto concerne gli aspetti quantitativi, possiamo ottenere in modo esplicito i rendimenti delle macchine termiche nelle varie situazioni. Consideriamo per prima un motore termico reversibile, ossia una situazione in cui (per definizione) non vi è produzione di entropia (v. figure 5).



**Figura 5.** Schema di principio di un motore termico reversibile: dato che non vi è produzione di entropia, tra i flussi in entrata ed in uscita di entropia vale in particolare la relazione  $I_{S,1} = I_{S,2}$ .

Il rendimento  $\eta_{rev}$  può essere allora ottenuto in modo diretto; infatti, dalla definizione, abbiamo immediatamente:

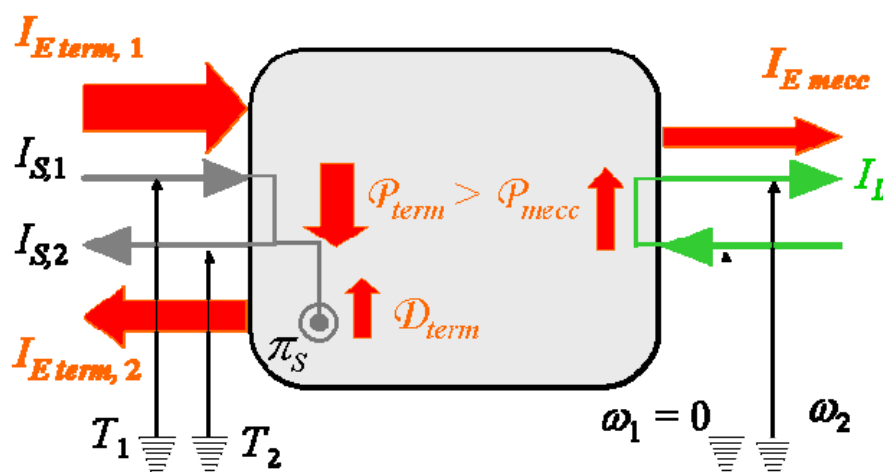
$$\eta_{rev} = \frac{I_{E\ mecc}}{I_{E\ term,1}} = \frac{I_{E\ term,1} - I_{E\ term,2}}{I_{E\ term,1}} = \frac{T_1 \cdot I_{S,1} - T_2 \cdot I_{S,2}}{T_1 \cdot I_{S,1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1$$

<sup>13</sup> Questo aspetto è particolarmente evidente nella discussione del bilancio termico delle reazioni chimiche: a seconda del grado di accoppiamento della reazione, la potenza chimica  $\mathcal{P}_{chim}$  teoricamente a disposizione viene utilizzata in misura più o meno importante per "spingere" un processo secondario (come in una batteria).

<sup>14</sup> Si vedano anche M. D'Anna et al. *L'equazione di bilancio per l'energia e l'entropia* [8], in cui sono discussi parallelamente l'approccio classico alle macchine termiche e quello qui proposto, nonché le referenze lì indicate.

<sup>15</sup> Può essere interessante osservare come Sadi Carnot esprima esplicitamente questa condizione: per in rendimento «la condition nécessaire du maximum est donc qu'il ne se fasse dans les corps employés à réaliser la puissance motrice de la chaleur aucun changement de température qui ne soit pas dû à un changement de volume» (p.23) [...] «ou, ce qui est la même chose autrement exprimé, s'il n'y a jamais de contact entre des corps de température sensiblement différentes.» (p. 38) [9].

Per quanto attiene alla situazione di un motore termico irreversibile (ossia un motore che impiega processi in cui vi è produzione di entropia) possiamo procedere in modo analogo (v. figure 6).



**Figura 6.** Schema di principio di un motore termico irreversibile: dato che in questa situazione vi è produzione di entropia, tra i flussi in entrata ed in uscita ed il tasso di produzione di entropia, vale la relazione  $I_{S,1} + \pi_S = I_{S,2}$ . Inoltre, dato che parte dell'energia a disposizione deve essere "legata" all'entropia prodotta, la potenza termica associata alla "caduta" dell'entropia non può essere "caricata" interamente sul portatore meccanico:  $P_{mecc} < P_{term}$ , ciò che ci fa presumere un rendimento minore di quello del caso reversibile.

Per il rendimento, ricordando che nella situazione considerata  $I_{S,1} < I_{S,2}$ , anche in questa situazione possiamo procedere direttamente:

$$\eta_X = \frac{I_{E\ mecc}}{I_{E\ term,1}} = \frac{I_{E\ term,1} - I_{E\ term,2}}{I_{E\ term,1}} = \frac{T_1 \cdot I_{S,1} - T_2 \cdot I_{S,2}}{T_1 \cdot I_{S,1}} < \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \eta_{rev}$$

## Riferimenti bibliografici

- [1] F. Herrmann, *Der Karlsruher Physikkurs*, Aulis, Köln (1995); per la traduzione italiana si veda <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/>.
- [2] F. Herrmann, G. Job, *Altlasten der Physik*, Aulis, Köln (2002).
- [3] I documenti possono essere ottenuti ai seguenti indirizzi web:  
<http://www.gesn.ch/TD/0/organizzatori%20cognitivi%20IV-03.pdf> e  
<http://www.gesn.ch/TD/0/energia%20IV-03.pdf>
- [4] F. Herrmann, "The Karlsruhe Physics Course", *Eur. J. Phys.* **21** (2000) 49.
- [5] C. Agnes, M. D'Anna, F. Herrmann, P. Pianezzi, "Un Atto di Fisica o l'Entropia Giocosa", Atti XLI Congresso AIF (Casarano), 34-43 (2002).
- [6] G. Job, *Das chemische Potential im Physik- und Chemie-Elementarunterricht*, in G. Falk und F. Herrmann, *Konzepte eines zeitgemässen Physikunterrichts – Heft 2 – Teil 2: Das Grössenpaar Menge und chemisches Potential*, Schroedel, Hannover, 67-78 (1978).
- [7] M. D'Anna, U. Kocher, P. Lubini e S. Sciarini, "Il potenziale chimico: potenzialità didattiche di una grandezza poco conosciuta ma di grande utilità" (sottoposto per pubblicazione a *La Chimica nella Scuola*).
- [8] M. D'Anna, U. Kocher, P. Lubini e S. Sciarini, "L'equazione di bilancio per l'energia e dell'entropia", di prossima pubblicazione su *LFnS*.

- [9] S. Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, Bachelier, Paris (1824), edizione critica a cura di R. Fox, Vrin, Paris (1978).

### Ulteriori riferimenti

- [10] F. Herrmann, *Thermodynamik, Der Karlsruher Physikkurs für die Sek. II*, vol. 2, Aulis (2002).
- [11] J. Ferbar, "Irresistibility of irreversibility", *Proceeding of the 1996 GIREP Conference Ljubljana "New Ways of teaching Physics"*, (ed. S. Oblak et al.), 151-161 (1996).
- [12] G. Marx (edited by), *Entropy in the School*, Proceedings of the 6<sup>th</sup> Danube Seminar on Physics Education, R. Eötvös Physical Society, Budapest (1983).
- [13] G. Job, *Neudarstellung der Wärmelehre*, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main (1972).
- [14] H.U. Fuchs, *The Dynamics of Heat*, Springer, New York (1996).
- [15] G. Falk, F. Herrmann, B. Schmid, "Energy forms or energy carriers?", *Am. J. Phys.*, 51, 1074 – 1077 (1983) (traduzione italiana: "Diverse forme di energia o portatori di energia?", *LFNS*, XII, 4, 169-172 (1989).
- [16] E. Starauschek, *Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs – Ergebnisse einer Evaluationsstudie*, capitoli 9 e 12; Logos, Berlin (2001).