

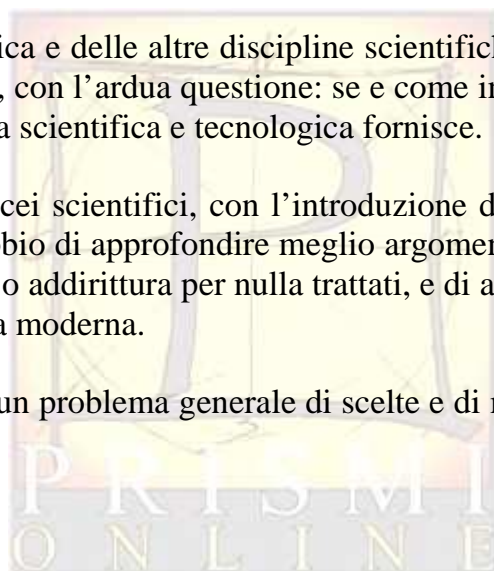
La fisica di Karlsruhe²

INTRODUZIONE

L'insegnamento della fisica e delle altre discipline scientifiche deve confrontarsi, almeno da un certo momento in poi, con l'ardua questione: se e come integrare le nuove conoscenze che continuamente la ricerca scientifica e tecnologica fornisce.

La recente riforma dei licei scientifici, con l'introduzione della fisica in tutti gli anni di corso, permetterà senza dubbio di approfondire meglio argomenti di fisica classica, che oggi possono essere solo sfiorati o addirittura per nulla trattati, e di andare un "po' più in là" nello studio della cosiddetta fisica moderna.

E tuttavia rimane aperto un problema generale di scelte e di metodo, a cui il presente articolo vuole riferirsi.



L'INSEGNAMENTO TRADIZIONALE E LA FISICA DI KARLSRUHE

Il modello di insegnamento tradizionale, essenzialmente concepito e sviluppato seguendo la storia della disciplina, propone un approccio suddiviso in capitoli solo parzialmente comunicanti tra loro: la meccanica, la termodinamica e l'elettromagnetismo, per citare i fondamentali del corso liceale, sono di fatto trattati, sia a livello di costrutti logici, sia di linguaggi, sia di strutture come capitoli a sé stanti.

Ciò può essere fonte di confusione per gli alunni, che in molti casi non riescono a coglie-

¹ Docente di Matematica e Fisica al Liceo Scientifico Statale "G. Ferraris" di Varese.

² Karlsruhe è la città tedesca sede dell'università in cui è nata l'idea di rinnovare l'insegnamento della fisica secondo gli schemi proposti nell'articolo. Oggi questa proposta didattica è nota come "fisica di Karlsruhe".

re né la sostanziale unicità della conoscenza fisica né la connessione tra essa e le altre discipline scientifiche e negli effetti tale approccio ostacola, almeno al nostro livello, una sistemazione organica e integrata dei nuovi saperi e modelli.

Ovviamente il problema non è quello di voler affrontare, a livello liceale, le nuove idee in modo esaustivo e completo, quanto piuttosto quello di dare agli allievi una visione completa ed unitaria dei saperi tradizionali e di preparare un terreno adeguato a visioni nuove.

Il cosiddetto “corso di fisica di Karlsruhe” (nel seguito KPK) si inserisce nel tentativo di modernizzare e razionalizzare l'insegnamento di questa disciplina rinunciando quasi completamente all'approccio storico ed ai modelli di insegnamento da esso generati e cercando di liberare la fisica da nozioni obsolete, necessarie un tempo quando poco si sapeva di esse, ma che oggi appaiono superate ed inutili.

Lo scopo è realizzare una grande unificazione nel linguaggio e nei metodi sulla base di un'idea forte: che in sostanza tutta la fisica può essere formulata su una struttura teorico-operativa comune a tutte le tradizionali branche in cui si è evoluta la disciplina.

Il primo ed immediato vantaggio di un simile approccio è subito evidente: l'apprendimento di un unico schema concettuale e linguistico permette una grande economia di pensiero e rende fenomeni apparentemente diversi descrivibili con le medesime modalità.

La trattazione tradizionale della meccanica è fondamentalmente diversa da quella della termologia o dell'elettromagnetismo, dell'ottica o della meccanica delle onde. In esse si introducono concetti, metodi e linguaggi specifici e diversi tra loro che rendono difficile una visione sintetica fra queste parti e tra la fisica e altre discipline. Ad esempio, la tradizionale suddivisione dell'energia nelle sue “forme” induce probabilmente molti studenti a ritenere essenzialmente diverse quelle quantità. Lo stesso vale per il concetto di forza nelle sue varie coniugazioni.

L'approccio del KPK restituisce alle grandezze fondamentali della fisica (energia, quantità di moto, momento angolare, entropia...) il loro ruolo centrale ottenendo, in tal modo, una descrizione unitaria - e talvolta anche più semplice - dei fenomeni attraverso la realizzazione di una struttura concettuale comune.

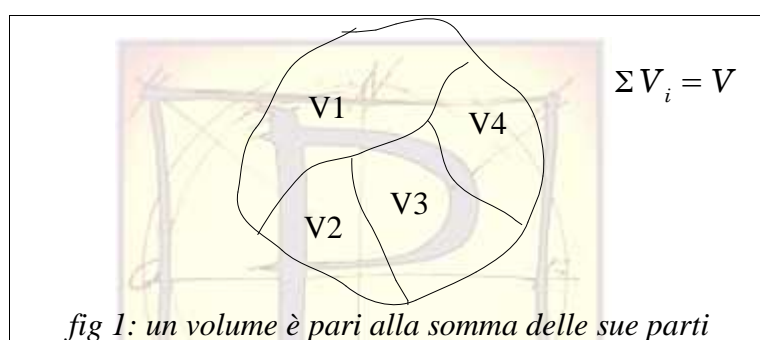
Permette inoltre una più fruttuosa interazione con altre discipline scientifiche (in primo luogo con la chimica) consentendo di creare basi comuni più solide e chiare.

IL MODELLO KPK³

Il modello del KPK è fondato sul seguente schema generale: le trasformazioni fisiche in un sistema sono descritte come variazioni di grandezze di tipo “quantità” sotto forma di correnti della medesima provocate da grandezze di tipo spinta, a quelle coniugate.

Le grandezze “estensive” o di tipo “quantità di...” sono caratterizzate dal fatto di essere globali: sono cioè riferite ad un volume delimitato da una superficie; ad esse possono essere associate (rispetto al volume) una densità media ed una locale e hanno la caratteristica fondamentale di essere additive: se si suddivide il volume in parti la quantità totale sarà pari alla somma delle quantità contenuta nelle singole parti.

Ci si può creare un’immagine semplice di esse: possono essere pensate come una “sostanza contenuta” nel volume. Ad esempio, il volume stesso è grandezza estensiva.



Sono grandezze estensive: l’energia, la quantità di moto, il momento angolare, la massa, la carica elettrica, l’entropia, la quantità di sostanza. Per ciascuna vale una rappresentazione come quella di fig. 1. Indichiamo queste quantità con il generico simbolo X .

Ad ogni quantità X si può allora associare una corrente I_X che descrive il suo tasso di variazione attraverso A nel tempo: I_X ha carattere locale ed ha la caratteristica di essere additiva.

È anche possibile associare alla corrente una densità superficiale di corrente media $\bar{J}_X = \frac{\delta I_X}{\delta A}$, ovvero a livello locale $J_X = \frac{dI_X}{dA}$.

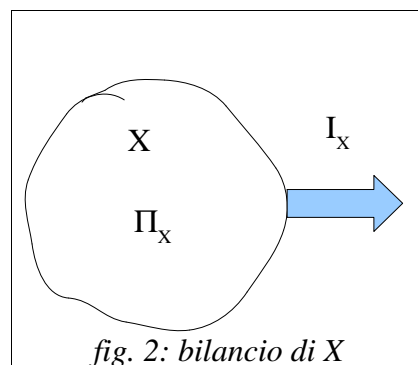
Se il sistema non è isolato, la quantità di grandezza estensiva contenuta in V può cambia-

3 Una premessa necessaria: nelle parti seguenti si è fatto un uso, ancorché limitato, del calcolo differenziale e della sua notazione. Per coloro che non conoscono tali metodi basterà sostituire a $\frac{dX}{dt}$, velocità di

variazione istantanea di X rispetto a t , il rapporto $\frac{\Delta X}{\Delta t}$ tra la variazione finita della grandezza X e la corrispondente variazione finita della grandezza t : tale rapporto definisce la velocità di variazione media. Se Δt è “molto piccolo” i due risultati saranno “quasi uguali”.

re perché la quantità è prodotta o annichilita all'interno di V o perché essa fluisce attraverso la superficie A che delimita il volume.

Le caratteristiche sopra indicate implicano che tali grandezze soddisfino un'equazione di bilancio: cioè la variazione nel tempo di X all'interno di V è descritta da $\frac{dX}{dt} = \Pi_X + I_X$, dove il termine Π_X rappresenta il tasso di produzione di X .



Potremmo chiamare questo termine “sorgente” nel caso in cui esso sia positivo, “pozzo” nel caso opposto. Per le grandezze conservate evidentemente e sempre $\Pi_X = 0$; ci sono tuttavia grandezze per cui ciò non vale: ad esempio per l'entropia, $\Pi_X \geq 0$. Per convenzione inoltre si ha $I_X > 0$ se entrante.

La caratteristica di essere grandezza estensiva assume un significato diverso e più ampio di quello di grandezza conservata. È evidente inoltre che solo per le grandezze estensive ha senso porsi il problema della loro conservazione.

Ad ogni grandezza estensiva risulta associata una grandezza “intensiva” o di tipo “spinta” (quelle che in fisica vengono generalmente definite potenziali). Tali grandezze sono grandezze locali e non godono della proprietà di essere additive (rispetto al volume). In generale si è interessati alle loro differenze. Le grandezze estensive e le loro corrispondenti grandezze intensive vengono definite coppie di grandezze (tra loro) coniugate o coniugate per l'energia.

Vi sono poi grandezze che non rientrano nello schema: lo spazio ed il tempo innanzitutto, e alcune grandezze caratteristiche legate ai materiali o alle attrezzature.

Accanto a questi concetti possono essere poi definiti in ogni ambito della fisica (in analogia con quanto si fa per l'elettromagnetismo) i concetti di resistenza e capacità. Il trasporto di X può incontrare resistenza: definiamo allora la resistenza $R = \frac{\delta \zeta}{I_X}$ come il rapporto tra la spinta (la differenza di potenziale) e la relativa corrente. La capacità invece misura la quantità di grandezza estensiva che può stare in V : $C = \frac{X}{\zeta}$. Tali concetti possono essere altrettanto convenientemente applicati all'elettromagnetismo o ad esempio a modelli idraulici o meccanici.

Consideriamo alcuni esempi.

Se X è la carica elettrica, l'equazione di bilancio dà $\frac{dQ}{dt} = I_Q$. Se X è la quantità di moto, allora $\frac{d\mathbf{p}}{dt} = I_P = \mathbf{F}$, che altro non è che il secondo principio della dinamica espresso

nella formulazione originale di Newton. È importante notare che queste equazioni *non sono* le definizioni di ciò che comunemente chiamiamo intensità di corrente e forza. Nel caso dell'entropia, $\frac{dS}{dt} = I_S + \Pi_S$: accanto alla corrente di entropia appare il termine (sempre positivo per questa grandezza) che rappresenta il tasso di creazione all'interno della regione considerata.

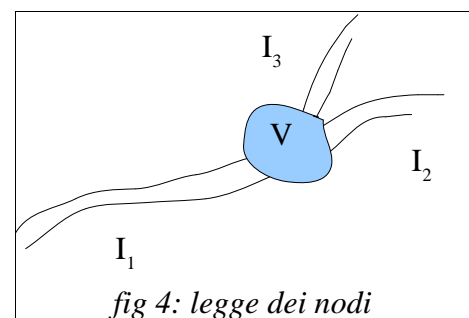
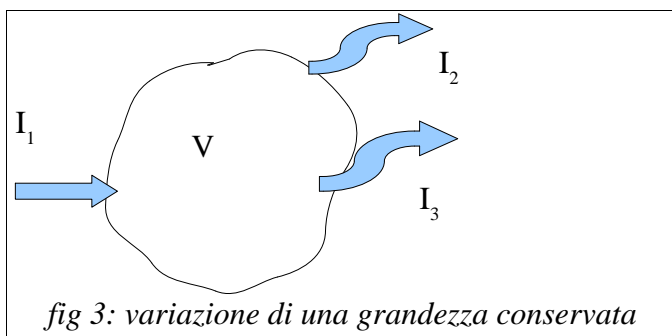
Nella successiva tabella vengono riportate alcune coppie di grandezze coniugate e le relative correnti, classificate secondo lo schema precedente.

Grandezze estensive	Grandezze intensive	Intensità di corrente
Quantità di moto \mathbf{p}	Velocità \mathbf{v}	Corrente di quantità di moto o forza $I_p = \mathbf{F}$
Momento angolare \mathbf{L}	Velocità $\boldsymbol{\omega}$	Corrente di momento angolare (momento della forza) $I_L = \boldsymbol{\tau}$
Carica elettrica Q	Potenziale elettrico ζ	Corrente elettrica $I_Q = I$
Entropia S	Temperatura T	Corrente di entropia I_S
Quantità di sostanza n	Potenziale chimico μ	Corrente di quantità di sostanza I_n

Il meccanismo generale che regola i cambiamenti di stato del sistema può allora essere descritto da quest'unico schema: la grandezza estensiva X viene trasportata dalla corrente ad essa riferita I_X a causa della spinta (o meglio della differenza di spinta ad essa associata). Se il sistema è isolato il trasporto avviene spontaneamente da valori di potenziale maggiore a valori di potenziale minore.

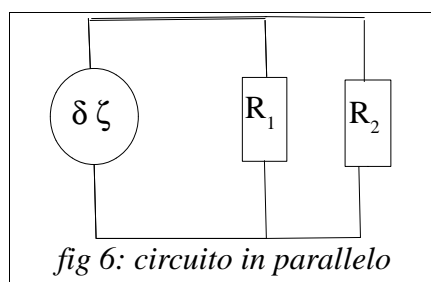
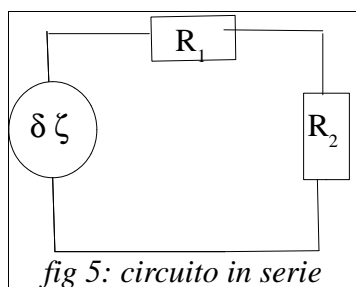
È possibile allora studiare con questi pochi concetti modelli già piuttosto complessi.

Ad esempio, se X è conservata, ipotizzando che ci siano correnti entranti ed uscenti dal volume V si otterrà dall'equazione di bilancio: $\frac{dX}{dt} = I_1 + I_2 + I_3$.



Facendo tendere a zero il volume V si ottiene $\frac{dX}{dt} = 0$ e di conseguenza la legge dei nodi $0 = I_1 + I_2 + I_3$ (fig. 4).

Come altro esempio è possibile studiare circuiti in serie o in parallelo.

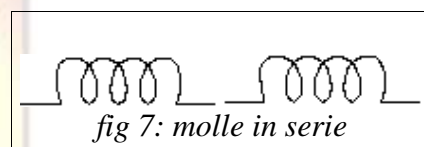


Nel circuito di fig. 5 (collegamento in serie) scorre una sola corrente; nel circuito rappresentato in fig. 6 è invece la spinta ad essere la stessa.

Negli stessi vale la legge delle maglie $\sum_k (\delta\zeta_K - I_{QK} R_K) = 0$.

Come applicazione pratica supponiamo di voler determinare la costante elastica equivalente di un sistema di due molle connesse fra loro in serie o in parallelo.

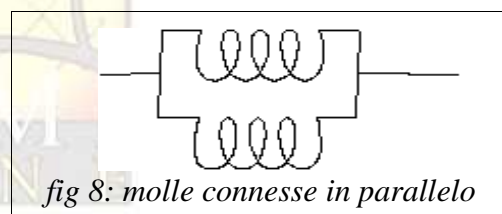
Nel primo caso (fig. 7) la corrente di quantità di moto attraverso le molle sarà la stessa: $I = k_1 \Delta l_1 = k_2 \Delta l_2$.



L'allungamento complessivo è pari a $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$.

Per la molla equivalente $I = k \Delta l = k (\Delta l_1 + \Delta l_2) = I \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right)$ da cui $\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$.

Nel secondo caso (fig. 8) l'allungamento sarà lo stesso, mentre la corrente di quantità di moto si dividerà nel nodo:



$$I = I_1 + I_2 = k_1 \Delta l + k_2 \Delta l = (k_1 + k_2) \Delta l .$$

Per la molla equivalente: $I = k \Delta l$, da cui $k = k_1 + k_2$.

IL RUOLO DELL'ENERGIA

La grandezza fisica *energia* occupa nella fisica moderna ed in molti aspetti della vita quotidiana e sociale un posto rilevante e fondamentale. Essa è la grandezza che in qualche modo presiede e regola tutte le trasformazioni che coinvolgono i sistemi fisici e la loro evoluzione.

Eppure si tratta di una grandezza difficile da comprendere data la sua natura astratta. A

partire da Cartesio e Leibniz si era formata progressivamente l'idea che dovesse esistere una grandezza universale presente in situazioni di natura assai diverse. Ciò a causa del fatto che altre grandezze fisiche facilmente misurabili si combinavano secondo proporzioni fisse. E tuttavia la stessa grandezza aveva il difetto di presentarsi in maniera diversa nelle varie situazioni. Oltretutto non se ne conoscevano né le caratteristiche principali né metodi per eseguire misure. Anche dopo la formulazione del principio di conservazione (intorno al 1850) si continuò a parlare di forme di energia in relazione al modo in cui essa si presentava. In particolare si introdusse una classificazione basata sulle forme di stoccaggio: ecco allora nascere il concetto di energia cinetica, potenziale, interna, elastica, atomica, etc. Dall'altro lato il problema dello scambio o del trasferimento di energia portò alla nascita dei concetti di calore, lavoro, energia elettrica, chimica, etc.

Se da un lato tale classificazione presenta certamente aspetti di utilità, rischia dall'altro di indurre lo studente a pensare che in effetti queste energie siano cose diverse tra loro.

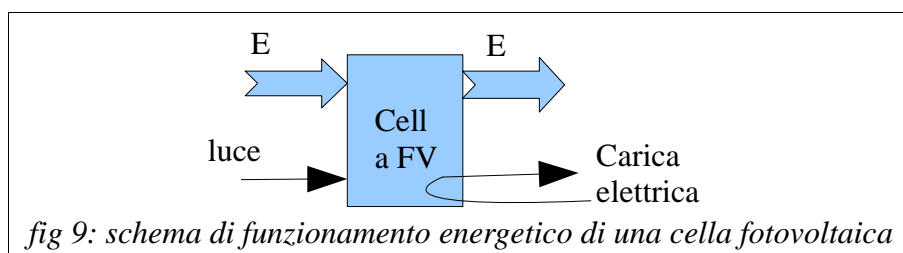
Per di più la teoria della relatività ha definitivamente fissato il ruolo dell'energia come grandezza fisica indipendente e non derivabile come calcolo da altre grandezze. Appare quindi ingiustificato dal punto di vista dei fondamenti parlare al giorno d'oggi di forme dell'energia legate a valori dedotti da combinazioni di altre grandezze fisiche.

Il KPK (nel corso introduttivo del primo anno di scuola secondaria) introduce l'energia addirittura all'inizio, nella prima lezione. Ne chiarisce immediatamente (se si vuole, in modo assiomatico) la sua natura estensiva e la sua conservazione.

Ciò rende questa grandezza immediatamente più comprensibile e trattabile, poiché è possibile parlarne come se si trattasse di sostanza contenuta in un recipiente.

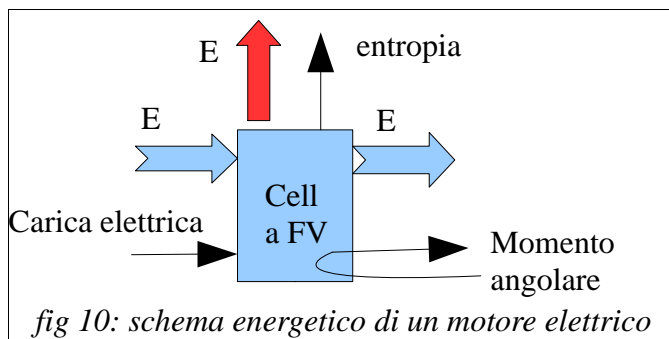
Alle diverse forme di energia viene sostituito (in modo che verrà giustificato tra poco) il concetto di portatore di energia: in questo modo tale quantità riacquista il suo significato unitario ed è semplicemente la grandezza che la trasporta ad essere di volta in volta diversa. In un corso di base il portatore è spesso identificato con una sostanza (acqua calda, combustibile, aria, carica elettrica), mentre in una trattazione più avanzata ci si riferirà a grandezze più astratte (quantità di moto, entropia, etc.).

Come esempio pensiamo ad una cella fotovoltaica (fig. 9). Il suo schema di funzionamento può essere facilmente rappresentato in un disegno: le frecce grandi rappresentano l'energia, quelle sottili il portatore a una via (il portatore viene disperso) o a due vie (i portatori che circolano). Anche se questa distinzione fra portatori non è fisicamente significativa può aiutare lo studente a concretizzare la situazione in relazione alla sua esperienza.



Invertendo il senso dei portatori si otterrà lo schema di funzionamento di una lampadina.

Come altro esempio in cui si tiene conto di processi dissipativi indichiamo lo schema di funzionamento del motore elettrico (fig. 10).



In questo caso parte dell'energia in ingresso viene dissipata nell'ambiente con il portatore entropia: tale quantità viene creata all'interno del motore.

L'EQUAZIONE DI GIBBS E LA STRUTTURA DELLA FISICA

L'osservazione sperimentale indica che quando un sistema cambia il proprio stato almeno due grandezze cambiano il loro valore. Questo fatto sta alla base della legge fondamentale di Gibbs, notevolissimo risultato che sostanzialmente descrive l'intera fisica in un'unica formula:

$$dE = v \cdot dp + \omega \cdot dL + T dS + \varphi dQ + \mu dn + \dots$$

Si tratta di un'equazione aperta in cui possono essere aggiunti eventualmente altri termini. Una delle sue conseguenze è che ad ogni variazione d'energia del sistema corrisponde sempre almeno la variazione di un'altra grandezza estensiva caratterizzante il sistema.

In una situazione reale alcuni di questi termini saranno nulli o trascurabili: a quelli diversi da zero assoceremo variazioni di energia di un certo tipo: per esempio i due primi addendi sono quelli a cui ci si riferisce parlando di lavoro meccanico, $T dS$ è calore, φdQ energia elettrica, μdn energia chimica, etc. Sottolineiamo anche il fatto che i segni con cui appaiono i vari termini sono frutto di convenzione e non hanno nessun particolare significato fisico.

Derivando rispetto al tempo dalla precedente equazione otteniamo:

$$\frac{dE}{dt} = v \cdot \frac{dp}{dt} + \omega \cdot \frac{dL}{dt} + T \frac{dS}{dt} + \varphi \frac{dQ}{dt} + \mu \frac{dn}{dt} + \dots$$

da cui

$$P = I_E = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F} + \boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{\tau} + T I_S + \varphi I_Q + \mu I_n + \dots$$

Questa equazione dice che l'energia fluirà attraverso le pareti del sistema sempre trasportata dalla corrente di un'altra grandezza intensiva. La corrispondente grandezza intensiva coniugata risulta essere una sorta di *misura della carica di energia* della corrispondente corrente (o della grandezza estensiva corrispondente).

In questa visione si capisce il ruolo di portatore di energia, assegnato alle grandezze fisiche estensive, e quello di spinta, assegnato alle loro grandezze coniugate. L'energia è trasportata da quantità di moto, momento angolare, entropia, carica elettrica. Il flusso di energia sarà più o meno intenso a seconda del valore del potenziale corrispondente: il portatore quindi potrà essere più o meno carico d'energia.

Dalle due precedenti equazioni possiamo costruire un'analogia estremamente interessante. Se riportiamo in una tabella i vari termini dell'equazione di Gibbs e li accostiamo alla tradizionale categorizzazione in forme otteniamo:

	Grandezza estensiva	Grandezza intensiva	Intensità di corrente	corrente di energia
<i>meccanica</i>	\mathbf{p}	\mathbf{v}	$I_p = \text{Forza } \mathbf{F}$	$P = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F}$
<i>elettrologia</i>	Q	φ	Intensità corrente elettrica I_Q	$P = \delta\varphi I_Q$
<i>termodinamica</i>	S	T	Intensità di corrente di entropia I_S	$P = T I_S$

Appare allora evidente come ognuna delle categorie corrisponda ad una coppia di grandezze coniugate, come ogni riga possa essere formalmente ottenuta dalle altre sostituendo le relative grandezze e che l'energia (il suo flusso) sia la grandezza fondamentale presente in ogni riga.

La tabella, letta nella visuale del KPK, suggerisce altre considerazioni interessanti.

Per esempio, nella trattazione tradizionale le grandezze quantità di moto ed entropia vengono introdotte molto tardi; la quantità di moto appare nel capitolo relativo allo studio degli urti e viene definita semplicemente come prodotto $m\mathbf{v}$ (formula che tra l'altro vale solo nell'ambito della meccanica). L'entropia viene citata nell'ultimo capitolo della termodinamica, in relazione al secondo principio.

In entrambi i casi viene nascosto il loro carattere di grandezza fisica indipendente di tipo estensivo e soprattutto il loro legame con l'energia.

In generale nell'approccio tradizionale viene trascurato il fatto che per ogni area della fisica due sono le grandezze estensive tipiche del sistema (una delle quali è sempre l'energia) e che un cambio di una di queste comporta necessariamente una variazione del valore dell'altra. Tentare di rappresentare queste aree facendo uso soltanto di una delle due diventa

quindi problematico. Cercare di trattare la termologia senza introdurre l'entropia come grandezza fondamentale, o la meccanica senza quantità di moto, è come parlare di elettromagnetismo senza carica elettrica e senza corrente.

UN ESEMPIO

Premettiamo una definizione: lo stato di equilibrio stabile è quello in cui il sistema, se perturbato, tende spontaneamente a ritornare. Tale stato è caratterizzato dal fatto che l'energia del sistema è minima.

Consideriamo un recipiente cilindrico contenente un gas separato in due parti da un setto mobile (fig. 11). Il setto divide il volume V in due volumi V_1 e V_2 con pressioni rispettive p_1 e p_2 .

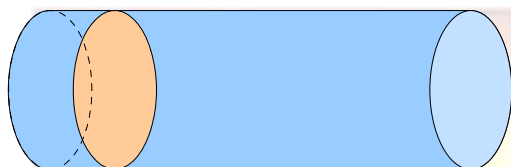


fig. 11: gas separato da un setto mobile

Ci domandiamo quale sarà la condizione di equilibrio se il sistema può evolvere liberamente ed è isolato. La pressione è la grandezza intensiva coniugata al volume. Applicando il teorema di Gibbs e trascurando ogni altro termine: $dE = p_1 dV_1 + p_2 dV_2$. Lo stato di equilibrio è caratterizzato dal fatto di essere quello a energia minima per cui $dE = 0$. Si ricava allora $p_1 dV_1 = -p_2 dV_2$.

Ma $V_1 + V_2 = V = \text{cost}$, da cui $dV_1 = -dV_2$; segue pertanto $p_1 = p_2$.

BIBLIOGRAFIA

Innovazione nella didattica della fisica di base: la fisica di Karlsruhe. Risultati e prospettive, Atti del convegno, Complesso universitario Monte S. Angelo, Napoli 28-30 settembre 2006

F. Herrmann, G. Job, *Concezioni inadatte all'insegnamento della fisica*

Michele D'Anna, *Concezioni inadatte all'insegnamento della fisica*, La Fisica nella Scuola, Anno XLII, n. 3, Supplemento, luglio-settembre 2009, p. 59-61

C. Agnes, M. D'Anna, F. Herrmann, P. Pianezzi, *Un atto di fisica o l'entropia giocosa*, La Fisica nella Scuola, Anno XXXVII, n. 3, Supplemento, luglio-settembre 2004, p. 34-43

G. Falk, F. Herrmann, B. Schmid, *Diverse forme di energia o portatori di energia?*, La Fisica nella Scuola, Anno XXII, n. 4, 1989

Sul sito dell'Università di Karlsruhe all'indirizzo <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de> sono reperibili (in italiano) i materiali relativi al corso di primo livello.