

**ENERGIA: TANTO NECESSARIA, TANTO POCO CONOSCIUTA.
E L'ENTROPIA POI...
M. Vicentini**

1. Introduzione

Crisi energetica, effetto serra, inquinamento, il prezzo del petrolio, pregi e rischi del nucleare, le fonti alternative.....

Queste parole sono un esempio di parole che oggi appaiono nei titoli dei giornali e telegiornali e che, probabilmente, continueranno ad apparirvi negli anni a venire.

E noi lasciamo che ci scorrano addosso a volte senza nemmeno chiederci cosa dovrebbe sapere sull'energia un cittadino comune in modo da saper affrontare con consapevolezza e razionalità i problemi sottostanti a tali parole.

Tali problemi hanno a che fare essenzialmente con i due concetti fisici correlati di energia e entropia. Pertanto dovrebbe essere compito dei corsi di fisica della scuola secondaria l'affrontarne la comunicazione didattica affinché gli studenti ne comprendano la valenza scientifica ma anche sociale.

In questo articolo vorrei avviare una discussione scientifica su come impostare tale comunicazione. A tal fine dopo una presentazione di come i concetti sono presentati nei manuali e nella divulgazione (par.2) e ad una riflessione storica (par.3) esporrò le idee di studenti e insegnanti (laureati in fisica o in matematica) in proposito (par.4).

Un esame dei problemi evidenziati dalla ricerca didattica (par.5) completerà l'esposizione dei punti utili alla discussione che riprenderò nella forma di domande nel paragrafo conclusivo nella speranza di sollevare un dibattito tra i ricercatori in didattica della fisica e i fisici docenti universitari.

2. La presentazione dei concetti nei manuali e nella divulgazione

Generalmente l'itinerario seguito nei libri di testo universitari per l'introduzione del concetto di energia parte dal secondo principio della dinamica nel modello del punto materiale. Il teorema delle forze vive permette quindi la definizione delle energie potenziale e cinetica e l'affermazione della conservazione dell'energia meccanica.

Ovviamente si accenna al lavoro delle forze non conservative che sembra mettere in crisi tale conservazione ma raramente l'effetto del riscaldamento per attrito viene messo in evidenza (dopotutto la temperatura non è una variabile meccanica!).

Successivamente la considerazione del modello del corpo rigido permette di allargare il concetto di energia cinetica includendovi quello dell'energia di rotazione. Il concetto di energia è comunque strettamente collegato a quello del lavoro delle forze

e ne consegue la definizione "l'energia è la capacità di compiere lavoro".

Tale definizione non viene ridiscussa nel capitolo della termodinamica in cui si connette al concetto di lavoro il concetto di calore per definire l'energia interna in un modello di sistema termodinamico non sempre ben correlato con i modelli usati precedentemente.

E' interessante notare che il tempo, variabile essenziale nella meccanica per descrivere il moto, viene messo da parte dopo un accenno ai processi di conduzione-convezione-irraggiamento del calore per entrare nel mondo senza tempo della Termodinamica¹

Il concetto di entropia sembra poi quasi un accidente legato alle macchine termiche e il legame tra i concetti di energia e entropia non risulta affatto chiarito dalla introduzione dell'entropia statistica. Emerge invece il concetto di "forme di energia", principalmente "calore e lavoro" che possono trasformarsi l'uno nell'altro. Raramente si trattano le sorgenti di energia.

Il mondo del movimento della dinamica e il mondo apparentemente quasi statico della TD sono, in qualche modo, connessi con l'identificazione del calore con l'energia cinetica di movimento dei costituenti microscopici del sistema.

Non sempre ci si rende conto che tale identificazione - che sostanzialmente lascia intendere che il calore è una funzione di stato - è in contraddizione con quanto enunciato nel 1° principio della termodinamica che introduce la funzione energia interna relegando calore e lavoro a "forme di energia in transito". Può essere utile ricordare in proposito che Clausius propose (1) la distinzione tra calore e lavoro interni al sistema e calore e lavoro esterni.

E' importante citare due approcci di corsi di lezioni oggi considerati più come testi di riferimento per studenti bravi che come manuali. Mi riferisco alle presentazioni date da Rogers in "Physics for an inquiring mind" (2) e da Feynman nelle sue Lectures (3).

Rogers, che affronta il problema dell'energia nel capitolo 26, esordisce affermando che "è facile dire che l'energia spiega tutto in fisica, chimica... forse biologia. Ciò è praticamente privo di senso... per fare un buon uso dell'idea di energia si deve sapere la storia del concetto e capire cosa significhi".

Parte quindi con una definizione piuttosto vaga descrivendo l'energia come "qualcosa che paghiamo, il prodotto di un combustibile". L'energia quindi è posseduta dal combustibile e può essere usata per fare "cose". La prima cosa discussa è il lavoro come forza per la distanza, energia trasferita tra due sistemi. Segue una discussione delle forme di energia (cinetica, potenziale, elastica) e della loro misura.

Viene poi introdotto il calore e la sua misura ($mC_s \Delta T$). [Anche qui vi è il problema del calore visto come energia cinetica molecolare]. Una classificazione delle varie forme di energia in relazione alle sorgenti di "combustibile" conclude il capitolo con un breve accenno all'entropia di cui è significativa l'affermazione: "il futuro

¹ Truesdell in proposito commenta che il tempo era così scomparso da liberare il simbolo t con cui verrà indicata la grandezza temperatura.

appartiene a coloro che possono manipolare l'entropia, coloro che capiscono l'energia saranno solo i contabili..... La prima rivoluzione industriale riguardava l'energia, ma l'industria automatica del futuro è una rivoluzione entropica" (tratto da Keffer....).

Feynman (3) parte dalla conservazione dell'energia, legge esatta che "afferma l'esistenza di una certa quantità, chiamata energia, che non cambia mai attraverso i molteplici mutamenti della natura". Idea piuttosto astratta che "si può comprendere solo se abbiamo una espressione per ognuna delle forme in cui si presenta. Segue quindi la discussione di tali forme.

Sono anche disponibili alcuni nuovi approcci sia in ambito italiano che internazionale che pongono il concetto di energia come centrale per la spiegazione dei fenomeni di cambiamento.

Citiamo in proposito i testi di Buontempo et al (4) e Baracca per la Scuola Secondaria italiana, la Fisica di Karlsruhe (5) sviluppata in Germania per la Scuola Secondaria e l'approccio inglese "Energy and change" (6).

La fisica di Karlsruhe (oggi disponibile anche in italiano) è interessante in particolare per l'approccio al concetto di entropia introdotto sostanzialmente come la controparte scientifica del concetto comune di calore. Nella analisi di processi stazionari le varie forme di energia vengono poste in relazione con i cosiddetti "portatori di energia": l'energia fluisce sempre insieme con il fluire di un'altra quantità estensiva: la massa per l'energia meccanica, la carica per l'energia elettrica... e l'entropia per l'energia termica.

L'approccio inglese punta invece in primo luogo l'attenzione sui processi non stazionari e sulle variabili intensive le cui differenze sono l'origine (o la causa) dei cambiamenti. Nei cambiamenti si hanno dei "trasferimenti di energia" e si sottolinea da un lato che "è importante pensare all'energia come una cosa che rimane la stessa, un valore che può essere calcolato" e dall'altro si sostiene che "parlare di forme di energia non è altro che un ornamento verbale alla descrizione dei cambiamenti".

L'energia non è la causa dei cambiamenti. Per calcolare l'energia si fa uso del modello microscopico.

A differenza dei manuali i libri divulgativi in genere non puntualizzano le definizioni formali del concetto di energia (anche perché in questa letteratura si tende ad evitare l'uso della matematica) e il legame fra i concetti di energia ed entropia non viene spesso evidenziato. L'attenzione viene focalizzata sulla conservazione dell'energia in tutte le sue forme. Tra le forme vengono spesso citate il calore e l'energia termica, parole usate sostanzialmente come sinonimi con poca o nulla considerazione del concetto di temperatura. Così si può trovare una "morte per colpo di calore" (senza fonti di calore) (7) e il processo di riscaldamento (aumento della temperatura) di un oggetto viene interpretato come "produzione di calore" in parziale contraddizione con il principio di conservazione in base al quale l'energia non può essere creata o distrutta. In alcuni casi si usa proprio la dizione "riscaldamento creato" o si dice che "la luce riscalda cioè produce energia termica nel corpo" (8).

Anche in un libro che ha come concetto portante il concetto di temperatura (9) a proposito di calore si usano aggettivi come assorbito, sviluppato, generato, si parla

di energia termica come "un altro modo di descrivere l'energia del moto" con ovvio riferimento ad un modello particellare della materia. Anche in questo caso manca la connessione calore-entropia in quanto l'entropia è introdotta su basi statistiche.

La definizione macroscopica di entropia si accompagna alla definizione statistica e ai concetti di calore ed energia in alcuni libri divulgativi di autori non fisici che tendono a far conoscere la portata dei principi della termodinamica in altre discipline, anche con attenzione alla Termodinamica dei processi (10) totalmente assente nei manuali che ignorano gli sviluppi nel campo posteriori alla nascita della termodinamica classica. Così per la geologia si può citare il libro "Mother nature two laws" (11), per l'economia il libro di Rifkin (12) "Una nuova concezione del mondo: l'entropia" e per la biochimica il libro di De Rosnay "Il macroscopico verso una visione globale" (13).

E' interessante notare che le applicazioni della termodinamica nelle altre discipline sono spesso rappresentate nei termini di diagrammi di flusso con attenzione alle sorgenti di energia.

Questo breve excursus su alcuni testi di divulgazione scientifica fa sorgere alcune domande riguardo alla connessione con la conoscenza fornita dai manuali. In particolare ci possiamo chiedere se tale conoscenza (a parte gli approcci più innovativi sopra citati) favorisce o meno la comprensione delle applicazioni dei concetti di energia e entropia a contesti non fisici.

Possiamo anche chiederci se l'apparente confusione tra calore ed energia cinetica e la scarsa attenzione al concetto di temperatura ricalcano le problematiche dello sviluppo storico. Può essere pertanto utile una breve riflessione su tale sviluppo.

3. Intermezzo storico

Lo spunto per questo intermezzo è tratto principalmente da due fonti: i saggi di Crosbie Smith (14, 15) sulle voci "energia" e "calore" nella Enciclopedia della Fisica e i volumi dei Benchmark Papers on Energy a cura di Bruce Lindsay (questi volumi raccolgono un insieme di articoli scientifici sul tema) (16).

Nella introduzione a questi volumi Lindsay afferma che l'idea chiave per capire l'energia è semplice: costanza in mezzo ai cambiamenti. I cambiamenti, caratteristica ovvia della esperienza umana, potrebbero essere trattati ciascuno per sé. Fin dall'antichità vi è stato tuttavia un desiderio di porre ordine tra esperienze apparentemente scorrelate. Un primo esempio è la leva semplice, macchina il cui significato scientifico di ricerca di invarianze non è citato nei libri di testo. L'invarianza della leva come macchina è la somma dei prodotti del peso per le distanze di sollevamento.

Questi prodotti richiamano alla mente il concetto di lavoro come forza per la distanza. La parola forza quindi ci suggerisce di guardare allo sviluppo dell'energia in tempi più recenti a partire da Newton che ne introdusse il concetto.

Dice tuttavia Crosbie Smith che vedere la storia della fisica come una

successione logica di deduzioni ricavate dalle leggi di Newton è del tutto inadeguato:

"Alla luce dell'evidenza storica, una presentazione del genere appare inadeguata; in primo luogo, quasi tutti i matematici europei del Settecento - e alcuni dei principali protagonisti della storia della fisica - in realtà non discussero mai a fondo le leggi di Newton. In secondo luogo, questo tipo di storie non prende in considerazione le aspre controversie sorte in merito ai fondamenti della meccanica, le quali hanno il pregio di mostrare come nella fisica l'emergere di principi fondamentali raramente sia un problema di deduzioni logiche accurate o di contributi oggettivi. In terzo luogo, l'introduzione dei principi dell'energia non può essere compresa correttamente senza valutare il ruolo avuto dalle trasformazioni economiche e sociali che si verificarono in Europa, e soprattutto in Gran Bretagna, all'epoca della Rivoluzione Industriale."

L'autore fa quindi risalire la ricerca della invarianza nei cambiamenti in primo luogo al "principio di conservazione del moto" formulato da Descartes da cui segue la conservazione della quantità di moto nell'Universo.

Newton accetta tale conservazione e introduce la forza come rapidità di cambiamento della quantità di moto, un principio attivo per la conservazione del moto. Vi sono tuttavia problemi sulla definizione di forza come dimostra il dibattito iniziato da Leibniz con l'introduzione del principio di conservazione della vis viva.

Tale dibattito inizialmente sembra far riferimento ad esperimenti di urti fra oggetti che, a seconda della loro elasticità, conservano o meno i prodotti mv ed mv^2 . Per Leibniz il moto (mv^2) in assenza di elasticità, si trasmette alle parti più piccole: "Io avevo sostenuto che nel mondo le vis vivae si conservano. Mi è stato obiettato che nella collisione due corpi morbidi o non elastici perderebbero la loro forza. Rispondo che non è così. E' vero che i corpi nella loro interezza la perdono rispetto al loro movimento totale, ma le parti l'acquistano, poiché la forza di collisione crea un'agitazione interna. Così questa perdita è solo apparente. Le forze non sono distrutte, ma dissipate tra le parti più piccole. Non c'è alcuna perdita, ma è come se qualcuno volesse cambiare una moneta con pezzi più piccoli".

Nel brano la parola "forza" esplicita le ragioni del dibattito. La forza coinvolta negli urti è, presumibilmente, ciò che si esplica nel contatto tra i due corpi. Con il beneplacito di tutti coloro che sostengono che il concetto di forza è intuitivo il dibattito sulla misura della forza motrice come mv o mv^2 indica che la percezione di un urto o una spinta coinvolge, di fatto, ambedue le grandezze.

Gli esperimenti di Gravesande in cui l'urto era fra oggetti delle stesse dimensioni e masse diverse lasciati cadere da diverse altezze su un materiale deformabile (in cui era possibile misurare le impronte lasciate dalla caduta e il cui risultato dava che si avevano impronte uguali per uguali vis vivae) fa propendere la bilancia in favore di Leibniz.

Il dibattito tuttavia prosegue nell'ambito matematico astratto della meccanica razionale.

Altri erano i problemi sollevati dal funzionamento delle macchine e altre le

soluzioni proposte in ambito ingegneristico ed economico.

Qui si pone la definizione del concetto di lavoro e della relazione con la vis viva, ora ridefinita come $1/2 mv^2$.

Il concetto di lavoro utile per confrontare l'efficienza delle macchine viene riferito alla misura che si ottiene dal "potere di elevazione" (ovvero il peso per la distanza cui viene sollevato - ci ricorda le leve degli antichi).

Ancora in ambito ingegneristico fa la sua comparsa, con le macchine termiche, il concetto di calore. Tale concetto era, nella teoria del calorico in cui si consideravano i processi verso l'equilibrio termico in assenza di lavoro, un buon indicatore di invarianza nelle trasformazioni.

Le macchine termiche pongono ora i due problemi del "valore meccanico del calore" e del "valore termico del lavoro". Problemi affrontati negli esperimenti di Joule che, è d'uopo ricordare, non si limitano alla presentazione data dai libri di testo che è limitata alla produzione di riscaldamento per via meccanica in quanto venivano utilizzate anche le sorgenti elettromagnetiche.

L'attenzione al funzionamento delle macchine termiche - ovvero alla produzione di lavoro dal calore sembra spostare l'accento più sul valore meccanico del calore che non sul valore termico del lavoro. Non è raro quindi trovare che la catena che dal lavoro dissipativo che provoca un aumento della temperatura del sistema e che successivamente, in opportune condizioni sperimentali può essere azzerato da un flusso di calore verso l'ambiente esterno venga semplificata nella affermazione che il lavoro si trasforma in calore.

In realtà il ruolo della temperatura, pur presente ad esempio nel lavoro di Carnot (che indica l'analogia tra il flusso di calore dovuto ad un ΔT e il flusso di materia dovuto ad un Δh), non sembra essere molto sottolineato.

Ampie sono invece le discussioni sulla interpretazione del calore come movimento di particelle di materia o di etere che sembrano indicare la credenza diffusa nel principio di conservazione del movimento.

Calore, lavoro, energia cinetica... manca ancora un ingrediente per la conservazione dell'energia. Sulla definizione della energia potenziale vanno ricordati i lavori di Rankine e di Thomson (17) che si inseriscono in un dibattito più ampio sulla transizione tra potenzialità e attualità che risale addirittura ad Aristotele. Nel dibattito appaiono i termini "vis viva virtuale" (Carnot), "vis potentialis" (Eulero), "energia statica" (Thomson). Rankine introduce l'aggettivo "potenziale" per tale energia anche con riferimento al nome (e concetto) "potenziale" già introdotto da Green per la funzione il cui gradiente dà le intensità gravitazionali, elettriche e magnetiche. Rankine definisce poi anche l'energia potenziale come energia di configurazione.

Apparentemente la convinzione che l'energia fosse legata a qualche forma di attività (movimento o lavoro) pone difficoltà ad interpretare l'energia potenziale come una vera energia.

Si affermano comunque le definizioni di Rankine sulla energia come capacità di eseguire lavoro sia come attività reale che come attività potenziale. Tali definizioni

hanno mantenuto la loro validità fino ai nostri giorni anche se nello scorso secolo altri tipi di energia sono entrati nel linguaggio scientifico (quali l'energia radiante, l'energia di riposo, l'energia nucleare).

Come abbiamo visto nei manuali l'energia potenziale presentata agli studenti è essenzialmente l'energia di configurazione attribuibile ad un sistema in una particolare situazione di equilibrio vincolato che può dar luogo ad un processo per rimozione del vincolo (una molla compressa, una massa ad una certa altezza, un oggetto ad una certa temperatura). Manca la discussione delle vere energie potenziali ovvero quelle che richiedono trasformazioni significative prima di essere in grado di produrre lavoro, ovvero le sorgenti di energia.

Questo breve excursus storico pone anche in evidenza che alcuni problemi dei manuali e dei libri divulgativi, e come vedremo nel prossimo paragrafo, degli studenti e degli insegnanti, siano la sopravvivenza di problemi presenti nella evoluzione storica del concetto di energia.

4. Le idee di studenti, insegnanti e ricercatori

Dalle ricerche sulle concezioni alternative è possibile trarre informazioni da un lato sulle idee degli studenti riguardo al concetto di energia e ad altri concetti termodinamici e dall'altro sulla posizione scientifica dei ricercatori in didattica autori di tali ricerche (18).

Non molte ricerche sono state rivolte ad individuare le concezioni degli insegnanti ma è possibile trarne indicazioni dalle attività svolte nell'ambito della Scuola di Specializzazione all'insegnamento della Regione Lazio.

E' possibile quindi inferire un quadro della evoluzione delle idee di senso comune degli studenti alle idee scientifiche.

a) La conoscenza comune sul concetto di energia

Possiamo definire le caratteristiche di tale conoscenza dalle ricerche sulle idee degli studenti di scuola primaria che non hanno ancora ricevuto precise informazioni di conoscenza scientifica. Vediamo così che possono presentarsi i seguenti quadri di conoscenze:

- Energia associata con l'attività, degli esseri umani o di oggetti;
- Energia come qualcosa contenuta in particolari oggetti;
- L'energia può essere generata, essere attiva, essere persa;
- L'energia è come un fluido che può essere trasferito in particolari processi;
- L'energia è la causa che fa succedere qualcosa.

Chiaramente gli studenti associano alla parola energia diverse istanze della vita comune focalizzando l'uno o l'altro aspetto.

In qualche modo emergono caratteristiche del concetto scientifico di energia oltre ad aspetti che possono essere correlati con i problemi visti nello sviluppo

storico.

b) Dalla conoscenza comune alla conoscenza scientifica

Man mano che la scuola trasmette informazioni scientifiche si vedono emergere problemi. Ad esempio:

- studenti di scuola superiore non capiscono bene la differenza fra "forza" ed "energia" in quanto vedono ambedue i concetti come qualcosa che produce azioni ed effetti;
- gli studenti hanno difficoltà a connettere energia ed effetti termici;
- gli studenti hanno difficoltà con l'accettare la conservazione dell'energia.

c) Le idee degli insegnanti

In una attività della SSIS è stato richiesto (in vari anni) ai laureati in matematica e fisica iscritti alla scuola di indicare le correlazioni tra la terna di concetti "forza-energia-entropia". Nella maggioranza dei casi i laureati tendevano a stabilire la correlazione forza-energia tramite il concetto di lavoro in quanto l'energia veniva definita come "la capacità di compiere lavoro". L'entropia: molte le dichiarazioni di scarsa comprensibilità della applicazione del concetto definito variamente come "la misura del disordine" o la "misura dell'irreversibilità".

Vediamo quindi come la definizione scientifica di energia come "capacità di compiere lavoro" finisce col far trascurare le caratteristiche pur presenti nella conoscenza comune relative alle sorgenti e alla dissipazione di energia. Quest'ultima non viene connessa con il concetto di entropia.

d) Le idee dei ricercatori

Negli articoli di ricerca sull'argomento in esame si possono trovare varie definizioni di energia:

- energia come una sostanza quasi-materiale;
- energia come la capacità di produrre lavoro;
- l'energia è un numero che ha lo stesso valore prima e dopo le eventuali trasformazioni.

Nel dibattito sulla natura dell'energia emergono due posizioni estreme: i materialisti e i concettualisti. Per i materialisti l'energia è una sostanza che può fluire tra diversi sistemi accompagnata da opportuni portatori.

Per i concettualisti l'energia è un concetto astratto che vuole spiegare la natura da un punto di vista teorico.

Queste due posizioni riflettono posizioni analoghe rintracciabili nello sviluppo storico.

Possiamo oggi affermare che non ha senso porre le due posizioni in contrasto ma che è necessario trovare un possibile accordo alla luce delle moderne concezioni scientifiche. E' anche necessario valorizzare, e non deprimere, le conoscenze comuni che possono fornire un ancoraggio per la comprensione scientifica.

Vediamo quindi le recenti proposte per una sensata didattica.

5. Suggestimenti della ricerca didattica

Anche se, come abbiamo visto nel paragrafo precedente, si hanno varie posizioni dei ricercatori in didattica rispetto alla comprensione del concetto di energia, si possono rintracciare nelle varie proposte alcuni punti chiave comuni. In particolare si indicano come aspetti fondamentali per l'insegnamento dell'energia i concetti di trasferimento, trasformazione, conservazione, dissipazione e immagazzinamento.

La difficoltà di comprensione del principio di conservazione, anche in relazione con le esperienze comuni, viene generalmente indicata e sono avanzati suggerimenti per il trattamento contestuale di conservazione/dissipazione o anche di trattare la degradazione prima della conservazione (19).

Ciò implica la considerazione dei processi, non solo meccanici, in generale. I processi sono causati da differenze (20) non dell'energia (se questa rimane costante): fra caldo e freddo, fra concentrato e diluito, fra racchiuso e diffuso.

A causa delle differenze in ogni processo si può parlare di un flusso di energia che si accompagna al flusso di altre quantità estensive: la quantità di moto per l'energia cinetica, la carica per l'energia elettrica, il calore per l'energia termica.

Vediamo qui che gli aggettivi cinetica, elettrica e termica caratterizzano la quantità che accompagna il flusso di energia (o, nel linguaggio del progetto di Karlsruhe, il "portatore" di energia).

Può essere interessante rilevare che è possibile, nel caso del movimento, rileggere il dibattito vis-vis viva come una incomprensione dello stretto legame tra le due vis: la quantità di moto è il portatore della vis viva.

Le difficoltà del passaggio dal concetto di energia in meccanica al concetto generale di energia che include l'energia interna della termodinamica, sono ben illustrate da Arons (21, 22).

Dice Arons: un ostacolo serio alla comprensione dei concetti di energia - e del concetto di lavoro..... risiede nella loro introduzione via il teorema delle forze vive nel modello del punto materiale. In particolare suggerisce la necessità di definire il sistema in esame distinguendo tra sistemi aperti e chiusi. Infatti il passaggio dalla meccanica alla termodinamica necessita dell'esame accurato dell'attrito che provoca riscaldamento e dissipazione di energia: l'attrito si ha per l'interazione tra le superfici degli oggetti in esame. Il modello del punto materiale (in cui tali superfici non esistono) è totalmente inadeguato. Vi è di più: nella meccanica del punto il teorema delle forze vive trasforma una relazione dinamica fra forza e accelerazione in una seconda (perfettamente equivalente) relazione dinamica tra energia cinetica e energia potenziale o lavoro delle forze conservative.

Domanda quindi Arons quale sia il concetto di lavoro da inserire nel 1° principio della Termodinamica e presenta una serie di esempi in cui il prodotto forza per spostamento non contribuisce al bilancio termodinamico (oggetto accelerato su un

piano orizzontale, persona su pattini, persona che compie un salto verticale).

Per Arons la soluzione si ha nella introduzione del concetto di energia interna attraverso le esperienze di Joule facendo attenzione a che tali esperienze siano presentate correttamente nelle due fasi del riscaldamento dovuto all'attrito viscoso in assenza di trasferimento di calore e del raffreddamento per sottrazione di calore.

Recentemente è interessante citare alcuni approcci didattici che suggeriscono di introdurre il concetto di energia contestualmente al concetto di forza (23) (Lemmer) anche per spiegare alcuni aspetti dei fenomeni di movimento.

Vi sono approcci che connettono il concetto di energia con i problemi della alfabetizzazione scientifica in relazione all'ambiente (24).

Hobson sostiene infatti che la comunicazione scientifica verso un cittadino comune dovrebbe includere temi sociali come le risorse energetiche e l'ambiente. I temi usati nei suoi corsi sono: l'uso dell'energia nei trasporti, il riscaldamento globale, la perdita globale di ozono.

Concludiamo il quadro della ricerca con due considerazioni di carattere più epistemologico che didattico. La prima considerazione (25) riguarda l'uso dei modelli nei problemi di conservazione dell'energia.

"Il teorema lavoro-energia come introdotto nella meccanica... è di limitata applicabilità. Una analisi di un sistema è corretta solo nei limiti del modello che è stato scelto. Un modello di particella materiale non può trattare l'energia interna".

Il suggerimento è quindi di comunicare agli studenti gli usi e le limitazioni dei modelli in generale. La seconda considerazione è di tipo più filosofico. "Energia: tra Fisica e Metafisica" è infatti il titolo di un articolo di Bunge (26) in cui l'autore sostiene che sia il concetto di energia che il relativo principio di conservazione, pur radicati nella fisica, ne straripano.

"Come concetto che si manifesta in vari settori, il concetto di energia deve essere un concetto filosofico e in particolare metafisico (ontologico). Esso appartiene alla classe dei concetti di cosa e proprietà, processo e evento, spazio e tempo, causa e probabilità, legge e tendenza..."

La sua definizione di energia viene quindi correlata con il concetto di possibilità di cambiamento (in inglese *changeability*) di ogni oggetto materiale o concreto (in cui sono inclusi anche i campi).

L'energia è una proprietà non una cosa, stato o processo ed è l'unica proprietà comune a tutti gli oggetti materiali.

Concludiamo quindi con la morale avanzata da Bunge: "Senza la filosofia la scienza perde profondità, senza la scienza la filosofia ristagna".

6. Una proposta didattica a partire dai cambiamenti

Voglio qui presentare una proposta didattica elaborata dal nostro gruppo di ricerca (27) che, pur avendo in comune alcuni aspetti con il progetto di Karlsruhe, se ne discosta in quanto assume come punto di partenza l'analisi di alcuni processi di cambiamento. La presentazione sarà ovviamente molto sintetica.

La proposta va nella direzione di guidare gli studenti di riconoscimento delle somiglianze fenomenologiche tra i cambiamenti in quanto tali somiglianze suggeriscono la possibilità di una spiegazione unificata attraverso i concetti di energia e entropia come organizzatori cognitivi.

Il riconoscimento di un comportamento "cinematico" simile (da cui la denominazione di "cinematica generalizzata" con cui si è data una prima presentazione dell'approccio (28)) può essere iniziato a partire dalle analisi dei cambiamenti che possono avvenire in un sistema tra due situazioni di equilibrio vincolato per l'azione di un trigger che elimina il vincolo che definisce la situazione iniziale.

L'esempio percettivamente osservabile è quello di un tubo ad U contenente un liquido mantenuto inizialmente con un dislivello fra i due rami del tubo. Si noti che, pur considerando in primis un cambiamento dovuto ad un movimento, il sistema considerato è un oggetto macroscopico, il fluido vincolato a muoversi nel tubo. L'osservazione del cambiamento verso la situazione di equilibrio con lo stesso livello del fluido nei due rami permette di introdurre la coppia di variabili estensiva X (legata alla quantità di fluido) e intensiva Y (legata al livello).

L'andamento anche qualitativo, del livello di liquido nei due rami in funzione del tempo è illustrato nella fig.1.

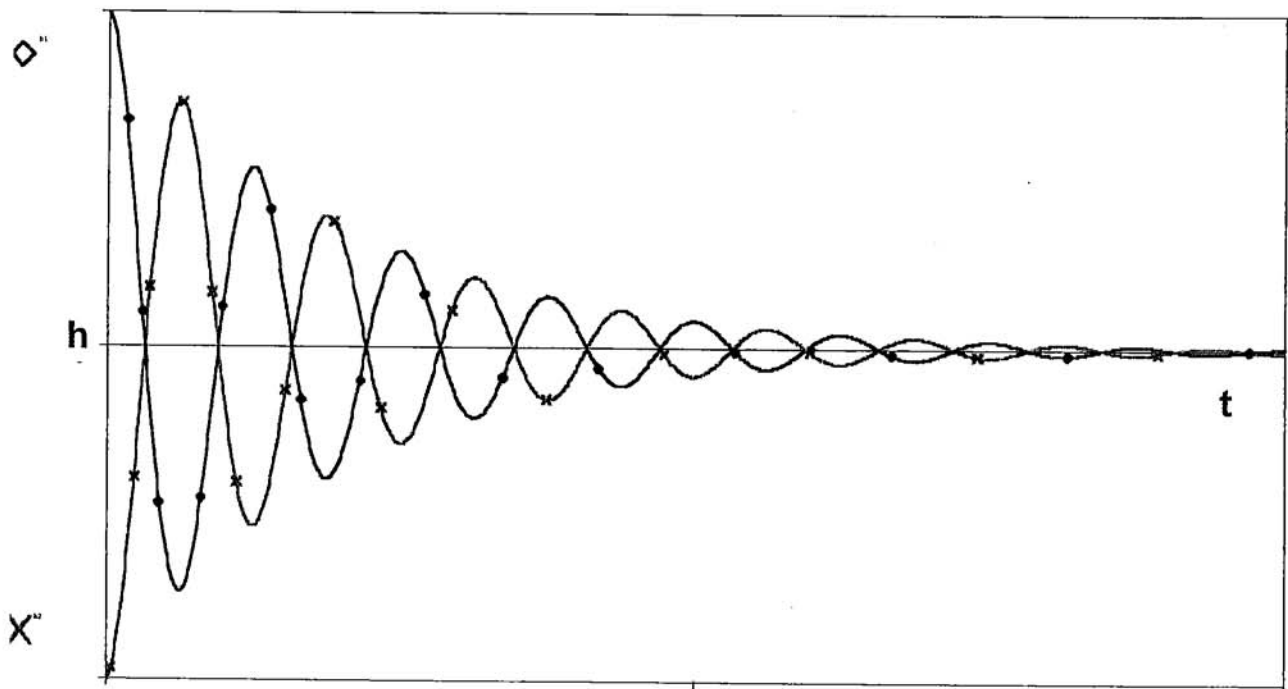


Fig.1 - La descrizione grafica del fenomeno

In tale andamento si possono individuare due tempi caratteristici: il periodo T , che caratterizza l'aspetto conservativo del movimento e la costante di smorzamento τ , che ne caratterizza l'aspetto dissipativo. Si può far notare, sempre a livello qualitativo, come cambia il rapporto fra la durata delle oscillazioni e il loro smorzamento quando si operi un restringimento in un punto del tubo (con un tubo di

plastica ciò è facilmente ottenibile): più il tubo si restringe più aumenta lo smorzamento fino a far scomparire del tutto le oscillazioni.

Emergono pertanto, già a livello di osservazione qualitativa, i due aspetti contemporaneamente presenti in un fenomeno della conservazione e dissipazione di un qualcosa da definire nel cercare una spiegazione. Esempi di comportamento analogo si hanno in altri fenomeni di movimento ma anche nella scarica di un condensatore e nel processo verso l'equilibrio termico. Quest'ultimo sembra inizialmente anomalo per l'assenza di oscillazioni ma è facilmente riconducibile al caso generale come istanza del caso in cui $T \ll \tau$.

Nel passaggio dalla osservazione alla spiegazione è utile soffermarsi sulla descrizione dei fenomeni nei termini di un modello di sistema e un modello di interazione. La discussione del modello di sistema come quantità macroscopica di materia in uno spazio confinato permette la generalizzazione delle coppie di variabili estensive X ed intensive Y e l'introduzione di una equazione di continuità per le variabili estensive.

Tale equazione può essere formulata in primo luogo in termini verbali come:
[l'aumento di X nel tempo] = flusso entrante di X - flusso uscente di X + la produzione di X nel tempo

e successivamente tradotta in linguaggio matematico:

$$\frac{dX}{dt} = \Phi_{ent} - \Phi_{usc} + \dot{X}_p$$

(con ovvio significato dei simboli).

Per il processo di cambiamento di Y può introdurre, in modo analogo, la relazione che lega la differenza nelle variabili intensive Y e il flusso di X . Verbalmente:

flusso di X + variazione nel tempo del flusso $\propto \Delta Y$.

La variazione nel tempo sarà nulla nei casi stazionari mentre in generale, usando il linguaggio matematico, si ha:

$$\Phi_X + \frac{d\Phi_X}{dt} \propto \Delta Y$$

in cui il termine lineare in Φ_X corrisponde all'aspetto dissipativo e il termine contenente la derivata all'aspetto conservativo.

Si può ora procedere verso un tentativo di spiegazione sottolineando che l'unificazione nella descrizione dei fenomeni suggerisce la ricerca di organizzatori cognitivi applicabili nei diversi casi.

Si può quindi introdurre il concetto di energia ragionando sul comportamento fenomenologico della fig.1: nella situazione statica iniziale vincolata si assume che il sistema possiede una potenzialità di cambiamento che dipende dal valore di Y corrispondente a tale situazione e dalla proprietà X del sistema.

La più semplice definizione di tale potenzialità è data da:

$$E_p = a X \cdot Y$$

La chiamiamo "energia di configurazione o potenziale". La rimozione del vincolo attiva l'interazione e il sistema inizierà a perdere la potenzialità E_p mentre acquista

velocità.

Si può correlare alla velocità una "energia di cambiamento" o "energia cinetica" ponendo:

$$E_c \propto X^2$$

ovvero l'espressione più semplice in grado di soddisfare la richiesta di simmetria nel caso di oscillazioni.

In assenza di smorzamento la somma $E_p + E_c$ rimane costante mentre in generale si dovrà introdurre un altro termine E_i nell'ipotesi di conservazione della grandezza energia così introdotta.

La strada è quindi aperta per introdurre le variabili energia ed entropia attraverso i due principi della termodinamica che saranno scritti nel linguaggio del cambiamento:

$$\frac{dU_i}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dL}{dt}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dQ}{dt} + \frac{dSp}{dt}$$

La produzione di entropia contribuisce alla variazione totale di una quantità tanto più piccola quanto più il processo è lento. Ne consegue che per i processi termici l'ordine di grandezza della variazione di entropia è dato dal flusso. In assenza di flusso termico tutta la variazione è dovuta alla produzione valutabile dalla formula

$$\frac{dSp}{dt} = \Phi_x \Delta Y$$

Si può notare che la proposta accoglie alcuni dei suggerimenti provenienti dalla ricerca.

Infatti si esaminano i processi introducendo le variabili estensive ed intensive e si trattano contestualmente la conservazione e la dissipazione dell'energia. Si introduce inoltre la produzione di entropia come il processo determinante la dissipazione dell'energia.

7. Che fare?

Una analisi del percorso fatto (a partire da un esame dei manuali fino ad arrivare, attraverso una riflessione sugli aspetti storici e sulle idee di studenti e insegnanti, ai suggerimenti emersi dalla ricerca didattica) permette di focalizzare alcuni punti che dovrebbero essere tenuti presenti nella impostazione di un percorso didattico sul concetto di energia. In particolare:

- a) Il concetto generale di energia richiede attenzione ad esplicitare gli aspetti epistemologici con particolare attenzione all'uso dei modelli, la considerazione degli aspetti termodinamici con particolare attenzione ai processi irreversibili.

In altre parole non si può parlare di energia senza entropia (29).

- b) Nel mondo reale tutto è soggetto a cambiamenti che avvengono nel tempo. Per gli studenti è quindi difficile immaginare il mondo senza tempo della termostatica. È necessario pertanto premettere alla introduzione dei concetti di energia interna ed entropia la descrizione fenomenologica dei processi verso l'equilibrio. L'esame dei processi che avvengono con oscillazioni smorzate permette di introdurre i concetti di energia cinetica e potenziale ma anche di indicare l'apparente perdita di energia (da collegare in seguito al concetto di entropia). Può essere opportuna una analisi dei processi nei termini di flussi di energia guidati dalle differenze nelle variabili intensive.
- c) Le esperienze di Joule vanno discusse facendo attenzione alle due fasi: la fase dell'aumento di temperatura generato dal lavoro dissipativo e la fase della successiva diminuzione per contatto con una sorgente di temperatura. Si noti che l'esperienza avviene nel tempo e che la conclusione nei termini della differenza ΔU tra due stati di equilibrio richiede una riflessione sui dati sperimentali. Può essere opportuno indicare che la relazione

$$\Delta U = Q - L$$

connette il cambiamento ΔU interno al sistema con le azioni esterne Q e L .

La trasformazione di lavoro in calore (vista anche nella evoluzione storica) non è pertanto diretta ma indiretta e può essere evitata con opportune pareti.

- d) Attenzione al concetto di lavoro se introdotto come il prodotto scalare di forza e spostamento. Non tutti i prodotti sono lavori termodinamici. Può essere qui opportuna l'analisi storica relativa al lavoro delle macchine.
- e) L'energia si trasforma: è meglio sottolineare che l'energia fluisce insieme ad altre variabili estensive. Questo collegamento non è immediato (basti pensare al dibattito vis-vis viva come un tentativo di non stabilire il collegamento tra energia cinetica e quantità di moto).
- f) Attenzione agli aggettivi: essi possono essere riferiti da un lato alle variabili estensive che trasportano il flusso di energia e dall'altro ai tipi di sorgenti di energia. Occorre fare le opportune distinzioni. In particolare pone un problema l'uso del termine "energia termica" spesso (anche storicamente) confuso con "energia interna". Analoghi problemi linguistici sono evidenti nell'uso della locuzione "forme di energia". La locuzione, abbinata all'uso del termine "energia termica" può indurre a pensare che all'interno di un sistema termodinamico l'energia si distribuisca in cassetti non comunicanti.
- g) Calore, calori specifici, calori latenti.... Anche qui vi è un problema linguistico (30) che mescola variabili di stato (calori specifici e latenti) con la variabile di processo (calore)
- h) Il 2° principio nella forma

$$\Delta S \geq \frac{Q}{T}$$

presenta una anomalia rispetto alle usuali relazioni fisiche con l'uso di una disuguaglianza. Anche in questo caso è opportuno far notare che la relazione

stabilisce un legame tra una variazione interna al sistema, ΔS , con una azione esterna. Tale legame può essere meglio esplicitato eliminando il segno di disuguaglianza e introducendo il concetto di entropia prodotta S_p :

$$\Delta S = \frac{Q}{T} + S_p$$

che può essere letta indicando che la variazione di entropia è data dalla somma dell'entropia che fluisce come calore e dell'entropia prodotta.

Nei processi quasistatici l'entropia prodotta può essere trascurata. Ciò permette di valutare la variazione di entropia come se fosse dovuta ad opportuni flussi di calore. In un processo adiabatico reale tutta la variazione di S è dovuta alla produzione.

E' ovvio che le affermazioni che propongo, pur se suffragate (a mio parere) dalla ricerca didattica, riflettono la mia personale rappresentazione mentale.

Vorrei quindi terminare con alcune domande sulla cui ricerca di risposte sarebbe opportuno un dibattito allargato tra i ricercatori in didattica e i fisici (impegnati in altre ricerche) coinvolti nei corsi di fisica di base.

Traggo le domande (parafrasandole) dai temi suggeriti alla discussione nella organizzazione del convegno "What physics should we teach" (31) che si è svolto a Durban (USA) nel luglio 2004.

- 1) Cosa riteniamo importante sappiano, sui concetti di energia e entropia, i cittadini comuni?
- 2) E' importante che la conoscenza appresa a scuola non sia frammentata in capitoli scarsamente comunicanti. Quale ruolo possiamo attribuire ai concetti di energia ed entropia per evitare la frammentazione?
- 3) Non dovremmo fare uno sforzo per collegare l'uso che si fa di tali concetti in fisica con l'uso che si fa in altre discipline scientifiche?
- 4) Quale ruolo attribuire nella didattica alla discussione degli aspetti storici ed epistemologici?
- 5) Quali abilità dovrebbe possedere un cittadino comune per affrontare razionalmente i problemi relativi a questioni energetiche o entropiche?
- 6) La termodinamica dei processi si può inquadrare nella cosiddetta "fisica moderna" da comunicare nella scuola secondaria e all'Università?

Referenze

- 1) Clausius M.R. - On the moving force of heat, Philos. Mag. Ser. 4, 2, pp.1-20, 1851
- 2) Rogers E.M.- Physics for the inquiring mind, Princeton Univ. Press (NJ), 1960
- 3) Feynman R.P. - Sei pezzi facili, Adelphi, Milano, 2000
- 4) Buontempo U., Cortini G., Tamburini S. - Orientarsi nella fisica, Sansoni, Milano 2000
- 5) Hermann F. Der Karlsruhe Physikkurs - Univ. Karlsruhe, 1993
- 6) Bohan R., Ogborn J. - Energy and change, Univ. Of London, Institute of Ed., 1996

- 7) Bruce C. - Sherlock Holmes e i misteri della scienza, Raffaello Cortina, Torino, 1997
- 8) Selleri F. - Le forme dell'energia, Dedalo, bari, 2001
- 9) Segrè G. - A qualcuno piace freddo, Bollati Boringhieri, Torino, 2002
- 10) Prigogine I. - Introduction to thermodynamic of Irreversible Processes, Wiley New York, 1967
- 11) Kirwan A.D. - Mother Nature two laws ,World Scientific Singapore, 2000
- 12) J. Rifkin - Una nuova concezione del mondo: l'entropia, Mondadori, Milano, 1982
- 13) De Rosnay J. - Il microscopio, verso una visione globale, Dedalo, Bari, 1977
- 14) Crosbie Smith - Energia, in Enciclopedia della Fisica, pp.412-420, vol. II
- 15) Crosbie Smith - Calore, in Enciclopedia della Fisica, pp.413-423, vol. I
- 16) B. Lindsay - Energy, Benchmarks papers, Halsted Press, Wiley, 1975
- 17) Roche J. - What is potential energy? Eur. J. Phys. 24, pp.185-196, 2003
- 18) Multimucuo I.V. - Improving students' understanding of energy, VU Huisdrukkerij, Amsterdam, 1998
- 19) Duit R. - In search of an energy concept in Energy matters (ed. Driver e Millar) univ. Leeds, 1986
- 20) Ogborn J. - Teaching about why things change Internal paper Inst. of Education, Univ. London, 1993
- 21) Arons A.B. - Development of energy concepts in introductory physics courses, Am. J. Phys, p.67, 1999
- 22) Arons A.B. - Teaching introductory Physics, Wiley New York, 1997
- 23) Lemmer M. e Lemmer T.N. - Contextualization as a didactical approach for Physics Education, Proceeding of a Conference, Durban, 2005
- 24) Hobson A. - Teaching relevant science for scientific literacy, Journ. Of College Science Teaching, 30, 238-243, 2000
- 25) Legge K.A., Petrolio J. - The use of models in problems of energy conservation, Am. J. Phys., 72, 436-438, 2004
- 26) Bunge M. - Energy: between Physics and Metaphysics, Science and Education, 9, 457-461, 2000
- 27) Amati V., Danusso L., Fioravanti E., Mangani V., Sidoretti S., Vicentini M. - "Not chapters but phenomenological similarities and unified conceptual explanation" in Proceedings of the Durban Conference, 2004
- 28) Vicentini M., Wanderlingh F. - Cinematica Generalizzata, La Fisica nella Scuola, XXX, pp.60-67, 1997
- 29) Wanderlingh F. - The big game of energy and entropy, in "Thinking Physics for teaching" (ed. Bernardini C., Tarsitani C., Vicentini M.), Plenum Press, N.,Y., 1995
- 30) Vicentini M. - Dal calore all'entropia, La Nuova Italia Scientifica, Roma, 1992
- 31) What Physics should we teach? Proceedings of a Conference Durban SA