

---

 Martha Lazzarini - Raffaella Raschellà

## NASCITA DEL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA

1	Il principio di conservazione dell'energia .....	2
2	Evoluzione concettuale e storica secondo Elkana .....	4
2.1	Evoluzione storica .....	4
2.2	Il problema del moto perpetuo .....	7
2.3	La meccanica razionale.....	8
2.3.1	Eulero .....	9
2.3.2	D'Alembert .....	9
2.3.3	Lagrange .....	10
2.4	La conservazione dell'energia .....	11
2.4.1	Newton .....	12
2.5	Il calore e l'energia .....	12
2.5.1	Le due leggi della termodinamica .....	12
2.5.2	La teoria dinamica del calore.....	15
2.5.3	La teoria del calorico.....	15
2.5.4	Il conte Rumford .....	16
2.5.5	La teoria dinamica di Humphry Davy.....	18
2.5.6	Carnot: la seconda legge della termodinamica.....	19
2.6	Helmholtz.....	20
2.7	CONCLUSIONI.....	22
3	Evoluzione concettuale e storica secondo Haas .....	23
	Confronto .....	30
	Bibliografia.....	31
	Appendice .....	32

## Introduzione

Obiettivo di questa tesina è presentare e discutere il principio della conservazione dell'energia dal punto di vista dello sviluppo storico, fino alla formulazione di Helmholtz nel 1847. Il testo è diviso in quattro parti. Nel primo paragrafo si dà un'introduzione generale al principio, come viene inteso oggi e quali problemi rimangono aperti; nel secondo viene riassunta la ricostruzione presentata da A. E. Haas nel suo libro "La storia del principio di conservazione della forza", nel terzo quella di Y. Elkana ne "La scoperta della conservazione dell'energia"; nel quarto vengono confrontati i due testi, evidenziandone analogie e differenze.

### 1 Il principio di conservazione dell'energia

Il principio di conservazione dell'energia è per la fisica attuale una delle leggi fondamentali, per la sua generalità e per la fecondità nel semplificare la descrizione di situazioni fisiche e nel dedurre altre leggi. Come tutte le leggi di conservazione, consente di fare previsioni senza conoscere i dettagli dei processi in esame, come spiega benissimo Feynman [1] con un'analogia: se osservassimo abbastanza a lungo una partita a scacchi con milioni di pezzi, non riusciremmo a comprendere tutte le regole del gioco, ma potremmo osservare dei comportamenti costanti, e ad esempio prevedere che dopo un certo numero di mosse, fuori dal nostro controllo, l'alfiere partito da una casella nera sarebbe ancora su una casella nera. D'altra parte, si distingue dalle altre leggi di conservazione, come quelle della massa, della carica, o della quantità di moto, perché più astratta: non si conserva qualcosa di visualizzabile, una sostanza o uno "stato", ma una grandezza che non rappresenta niente in particolare [1]. Inoltre non ha una definizione univoca, ma ha diverse forme a seconda dell'interazione cui è associata, suggerendo che sia definita in modo da conservarsi, e che quindi il principio abbia una componente aprioristica oltre che sperimentale. In questo senso si potrebbe interpretare l'analogia presentata da Feynman nelle sue famose Lectures per spiegare il concetto di energia [2]: un bambino gioca con dei cubi, e la mamma a fine giornata li conta. Avendo osservato per qualche giorno che il numero di cubi non cambia, aggiunge un termine alla sua formula

ogni volta che i conti non tornano, ad esempio per dedurre il numero di cubi immersi nel lavandino dalla variazione del livello, o presenti in una scatola chiusa dalla variazione di peso, o per includere i cubi portati da un amico, e così via. La componente aprioristica viene evidenziata esplicitamente da **Poincaré** [3], che non nega che il principio nasca dalla generalizzazione di un gran numero di fenomeni e abbia quindi un rapporto con l'esperimento, ma fa notare che a rigore può essere applicato solo all'intero universo, perché si riferisce a un sistema isolato, e che quindi perde senso ogni verifica sperimentale e il principio può essere solo considerato come una legge convenzionale, e come tale inattaccabile dall'esperienza.

D'altra parte, non solo la conservazione dell'energia è compatibile con le leggi fisiche attualmente note e in accordo con gli esperimenti, ma la fiducia in esso ha permesso, nei casi della sua apparente violazione, di scoprire nuove particelle e interazioni, e quindi di espandere e migliorare le teorie, e quindi anche l'accordo con gli esperimenti. Un esempio significativo è la proposta di introduzione del neutrino da parte di **Pauli** e **Fermi** e lo sviluppo di una teoria per l'interazione debole da parte di Fermi. Inoltre, oggi tutte le leggi di conservazione vengono legate a simmetrie spazio-temporali (teorema di **Noether**), in particolare la conservazione dell'energia deriva dall'invarianza temporale delle leggi fisiche, che è sicuramente un fatto sperimentale. Si può quindi anche attribuire una natura reale a questo principio. E' di questa opinione **Planck** [4]: "Da ciò deriva che il principio dell'energia non è né una tautologia né una definizione camuffata, né un postulato e nemmeno un giudizio a priori, bensì un principio sperimentale."

Secondo **Popper**, una teoria scientifica è tale se falsificabile, quindi chiaramente la componente sperimentale necessaria, ma l'interpretazione dell'esperimento non può prescindere da un'idea preesistente, quindi non si può sostenere che una legge fisica sia ricavata esclusivamente per induzione dalla realtà, e bisogna ammettere una componente aprioristica. La stessa idea viene espressa, in forma divulgativa, da **Feynman** che parla della necessità di "scommettere" su alcune leggi per poter fare previsioni ed estendere il campo di validità delle teorie fisiche [1], e da **Einstein** quando descrive l'attività del

ricercatore come quella di un investigatore, dove però il delitto è compiuto dal ricercatore stesso. [5]

Indipendentemente dall'interpretazione sulla sua natura, la conservazione dell'energia è oggi una legge centrale della fisica, di cui non si conoscono eccezioni. Rispetto alla formulazione iniziale data a metà dell'800 tuttavia, la fisica moderna ha dovuto apportare delle modifiche. L'invarianza di Lorentz porta alla legge di trasformazione tra massa ed energia, e quindi a includere nel calcolo dell'energia anche un termine legato alla massa. Quindi oggi non abbiamo due principi di conservazione separati, della massa e dell'energia, ma uno solo, della massa-energia. In questa forma, il principio è sempre stato confermato dall'esperienza, e le uniche violazioni sono quelle "concesse" dal principio di indeterminazione di Heisenberg.

## **2 Evoluzione concettuale e storica secondo Elkana**

### **2.1 Evoluzione storica**

La scienza è influenzata dai contesti sociali: è necessaria un'attenta analisi del pensiero per interpretare e comprendere gli enunciati di conservazione dell'energia e il concetto di energia che emerse gradualmente nel corso dell'800. Anche se il termine energia è di origine greca, l'emergere del concetto significativo risale ai primi anni dell'800, dopo che Helmholtz (saggio 1847) ebbe identificato nella conservazione una proprietà primaria dell'energia. Per quanto riguarda invece il concetto di conservazione, emerse dopo il teorema di conservazione della quantità di moto (600), della carica (700) e della materia (inizio 800). La legge di conservazione dell'energia differisce in modo fondamentale dalle altre dal punto di vista concettuale: la quantità di moto ha richiesto una decisione filosofico-scientifica circa il problema degli urti e della caduta libera: si conserva  $mv$  oppure  $mv^2$ ? Descartes pensò in parte a livello teologico che nel mondo si conservasse la quantità di moto (ovvero che potesse essere trasferita e mai distrutta): il moto può essere uno stato anziché un processo e può essere convertito anche in calore. Boyle spiega che quando un martello conficca un chiodo in una tavola, il moto del martello si trasforma in moto del chiodo, ma quando la testa del chiodo è a livello della tavola, i colpi del chiodo

producono calore. Per quanto riguarda la conservazione della carica, essa è una generalizzazione dell'osservazione sperimentale che nella produzione di cariche e nella neutralizzazione, le cariche positive sono prodotte e scompaiono in grandezze uguali: la produzione di carica è la redistribuzione di un fluido elettrico. La conservazione della massa è anch'essa una generalizzazione dell'esperienza: all'interno di una provetta non vi è cambiamento di peso in seguito ad una reazione chimica. Nel caso dell'energia invece, prima di enunciare il principio di conservazione, bisognava stabilire in forma quantitativa la conversione di energia nelle sue varie forme. Nell'800 vigeva l'idea che tutte le scienze si fondassero sulla conservazione. Dall'antichità ad oggi il principio guida delle scienze è stata la ricerca di elementi di costanza in un mondo caratterizzato dal mutamento nel tentativo di trovare un ordine al caos apparente: se non si accetta che la natura produce i suoi effetti per mezzo di processi stocastici in un mondo governato dal caso, allora la metafisica scientifica si spinge alla ricerca di regolarità e di leggi e deve condurre a principi di conservazione. Lo studio della conservazione conduce a cambiamenti sociali (basti pensare alla macchina a vapore): vi è un insieme di interazioni tra fattori scientifici, filosofici e sociali.

La storia della scienza dopo Newton, si occupa di problemi fondamentali: si deve (o si può) descrivere l'universo nei termini di particelle discrete con forze agenti tra loro? Una forza può agire attraverso un vuoto? Le forze sono proprietà essenziali della materia? E' **newtoniana** una descrizione del mondo sulla base di particelle discrete fra cui agiscono a distanza forze centrali, così come anche il programma di matematizzazione della meccanica portato a compimento dalla scuola francese di meccanica razionale: queste visioni del mondo presuppongono che la forza più importante sia quella gravitazionale che agisce a distanza che si trasmette attraverso l'etere.

Nel 700 vi erano altri due grandi tradizioni di ricerca scientifica che lottavano per procurarsi il primato in campo scientifico oltre a quello newtoniano: quello cartesiano, quello leibniziano. I **razionalisti matematici cartesiani** erano d'Alembert, Diderot, Lagrange, Eulero e Johann Bernoulli. I cartesiani non affrontarono nessuna discussione di concetti fondamentali, alcuna ricerca di principi, e il criterio della verità fu raramente

empirico in quanto divennero indizi di verità la traduzione in formule matematiche e l'eleganza di queste.

Il principale argomento di disputa tra i cartesiani e i newtoniani consisteva nel primato del concetto di forza. Anche i cartesiani accettavano i risultati di Newton ma insistevano sul fatto che esistevano qualità essenziali dei corpi a cui le forze potevano essere ridotte. I cartesiani consideravano le forze astrazioni matematiche utili per ragioni di calcolo.

La differenza fra newtoniani e **leibniziani** invece è che i principi di conservazione sono estranei ai primi ma fondamentali per i secondi, anche se negli scritti di Newton non è esplicito un atteggiamento contrario ad essi. Anche per Leibniz il concetto di forza è fondamentale ma al cuore della sua metafisica scientifica è piuttosto la sua conservazione.

I concetti centrali della fisica newtoniana erano il tempo, lo spazio, la massa e la forza; alla fine dell'Ottocento erano spazio, tempo, massa, energia. Y. Elkana vuole ricostruire l'emergere del concetto di energia investigando i fattori storico-filosofici e scientifici che portarono a tale mutamento. Hermann von Helmholtz, grazie alla sue profonde conoscenze matematiche e fisiche formulò per primo matematicamente il principio di conservazione dell'energia, anche se nella sua opera il concetto di energia viene ancora confuso con quello di forza. Prima di lui si pensava che le quantità che si conservassero fossero diverse nei vari casi quali ad esempio urti tra corpi duri, azione di molle, piani inclinati. Le espressioni che gli scienziati del 700 e 800 usavano per la parola forza erano: forza di muscolo, forza di una macchina,, forza gravitazionale, elettrica, magnetica, galvanica vitale, di natura. Il principio di conservazione dell'energia deriva dall'impossibilità di costruire una macchina col moto perpetuo che per i fisici empirici derivava dall'impossibilità reale di costruire questa macchina a seguito di numerose tentativi e questa base costituì la condizione necessaria per la formulazione di Helmholtz: se il principio è valido, non è possibile costruire una macchina col moto perpetuo; fra le sue considerazioni vi erano quelle dimensionali e matematiche secondo cui l'entità che si conserva, doveva essere connessa all'energia meccanica.

All'inizio dell'800 erano in voga oltre agli studi di meccanica, anche due teorie sul calore: quelle sulla sua natura meccanica o dinamica e quella materiale del calorico. Anche dopo

la formulazione di Helmholtz che portò ad una generalizzazione del principio di conservazione, alcuni scienziati tra cui Clausius, continuavano ad aderire alla teoria del calorico a dimostrazione che la connessione tra reale natura del calore e la termodinamica era assai debole. I primi sostenitori della teoria meccanica (Rumford e Davy) non ebbero alcuna idea della conservazione: essi sostenevano semplicemente che il calore generato è inesauribile e quindi non può essere materiale, essendo i materiali esauribili. In sostanza le tappe che portarono al principio di conservazione sono le seguenti:

- determinazione del principio di conservazione di una qualche entità (la forza) e attraverso di esso emersione del concetto di energia (meccanica)
- formulazione e separazione delle due leggi della termodinamica.
- Formulazione matematica di una teoria meccanica del calore

## 2.2 Il problema del moto perpetuo

Fin dai tempi più antichi i due termini forza ed energia furono confusi tra loro. Leibniz (1728) introdusse la conservazione della vis viva: egli non aveva un'idea di energia, ma della conservazione delle forze. *"La forza viva è quella che risiede in un corpo quando esso si trova in un movimento attuale. Questa forza viene posta proporzionale al quadrato della velocità. Occorre però che essa sia esercitata in modo attuale nella comunicazione del moto e per un tempo infinito. Per rivelarsi proporzionale al quadrato della velocità diventa diversa dalla forza morta (da quella che abbiamo considerato nell'urto di un corpo infinitamente duro). Essa non può né nascere né perire in un istante, occorre un tempo più o meno grande per produrla e distruggerla"*. Mentre questa discussione era in corso, furono mostrati all'Académie des Sciences nuovi congegni che dimostravano l'inutilità della ricerca del moto perpetuo. Nel 1775 l'Académie des Sciences dichiarò che il problema doveva considerarsi chiuso e che non avrebbe esaminato altri tentativi di soluzione. Alcuni fisici dell'epoca come l'olandese Gravesande non videro alcuna connessione tra l'impossibilità del moto perpetuo e il principio di conservazione e coloro che avevano tentato sperimentalmente di costruire una macchina non avevano dimestichezza con gli studi teorici e addicevano motivi metafisici come un qualche principio di conservazione (ad esempio che "nulla può crearsi dal nulla" o che "la causa

deve essere uguale all'effetto"). Dopo questo rifiuto non vi fu nessun passo in avanti verso la scoperta del principio di conservazione dell'energia per quasi tre quarti di secolo. La consapevolezza dell'impossibilità del moto perpetuo ebbe poco a che fare con la formulazione del principio di conservazione dell'energia. Infatti l'impossibilità di una macchina del moto perpetuo non è una condizione sufficiente per tale principio ma solo una condizione necessaria.

### 2.3 La meccanica razionale

Y. Elkana sostiene che nella prima formulazione del principio di conservazione dell'energia contenuta nel saggio di Helmholtz del 1847, la trattazione nella meccanica, le varie teorie del calore, il pensiero filosofico dell'epoca, furono ingredienti necessari. Vediamo ora nel dettaglio il contributo della meccanica.

Nella prima metà del Settecento lo sviluppo della meccanica fu affidato ai matematici. Le pietre miliari di questo sviluppo sono la *Mechanica* di Eulero del 1736, il *Traité de dynamique* di d'Alembert del 1743, e la *Mécanique analytique* di Lagrange del 1788. A quell'epoca i concetti su cui la meccanica era analizzata erano stati ormai formulati, tranne quelli di forza e di energia (quest'ultimo non era ancora nato). Erano noti anche due principi di conservazione: si riteneva che la quantità di moto vettoriale  $m\mathbf{v}$  (così chiamò Leibniz) si conservasse in tutte le condizioni e che anche la quantità scalare  $mv^2$  si conservasse almeno in urti elastici. La prima legge non consentiva di calcolare la velocità dopo l'urto, mentre per quanto riguarda la seconda legge non era chiaro cosa avvenisse in urti anelastici. Entrambe le quantità venivano considerate come un qualche tipo di forza, ma c'era ancora molta confusione: ogni ricercatore eseguiva esperimenti diversi e in relazione al caso particolare dei suoi esperimenti assegnava nomi diversi alle entità in gioco senza rendersi conto che i vari tipi di esperimento da essi condotti obbedivano in realtà alle medesime leggi. La legge di conservazione accettata all'epoca nel trattato di D'Alembert, fu posta successivamente da Lagrange al centro della meccanica e rappresenta in sostanza il principio di conservazione dell'energia limitatamente a sistemi meccanici ideali. Hilbert la descrisse nel suo trattato *Cause storiche del principio di conservazione dell'energia*: la legge



di conservazione dell'energia meccanica ha le sue radici in almeno tre aree della meccanica teorica: 1. principio di conservazione del lavoro meccanico (in ogni passaggio di energia potenziale da una forma all'altra, l'energia totale resta invariata). 2. il principio di conservazione della forza viva (in ogni passaggio di energia cinetica da una forma all'altra, l'energia totale resta invariata). 3. Il principio di conservazione di 1. e 2. congiuntamente. Lagrange adottò questa elegante formulazione matematica occupandosi ben poco della realtà fisica e come altri fisici del tempo accettarono che in alcune situazioni non idealizzate la vis viva e la vis potentia andassero perdute. Leibniz parlava invece di una vaga conservazione di forze.

### **2.3.1 Eulero**

Il trattato *Mechanica* di Eulero fu una delle sue opere giovanili: molto influenzata da Newton, ne portò avanti il programma in linguaggio matematico. In quest'opera la potenza (*potentia*) e la forza (*vis*) sono caratterizzate dalla variazione del moto di una particella che è prodotto da essa. La potenza ha una direzione: è quella forza che fa passare un corpo dalla quiete al moto o che produce una variazione del suo moto mentre la sua direzione è la linea retta lungo la quale essa si sforza di muovere il corpo. Anche la forza d'inerzia è una forza come qualsiasi altra: veniva definita come quella facoltà presente in tutti i corpi o di permanere in quiete o di continuare il moto uniformemente in linea retta. Successivamente Eulero si allontanò molto dal newtonianesimo per essere sempre più influenzato dalla filosofia di Leibniz che prima aveva avversato. Le sue opere giovanili sono comunque importanti soprattutto per l'influenza decisiva che ebbero su d'Alembert.

### **2.3.2 D'Alembert**

D'Alembert è stato un notevole matematico non solo per la sua opera scientifica ma anche per la sua attività letteraria e la sua influenza sugli intellettuali francesi. Non si rese conto di stare compiendo un importante lavoro concettuale nel campo della meccanica che ha attinenza col suo concetto di forza che rappresenta una mediazione tra la formulazione newtoniana, rigidamente vettoriale, e quella lagrangiana, rigidamente scalare. D'Alembert pubblicò il *Traité de dynamique* nel 1743 e la nuova edizione comparve nel 1758. Egli fondò la scienza della meccanica su tre principi, idee semplici e chiare, che dovevano essere

verità necessarie: la forza di inerzia, il principio del moto composto e il principio dell'equilibrio. Questi tre principi avrebbero dovuto condurre alla soluzione di tutti i problemi concernenti il moto di un corpo. Secondo Lagrange, d'Alembert aveva ridotto in questo modo la dinamica alla statica. Utilizzando una notazione moderna si può infatti scrivere il contributo di D'Alembert come segue: partendo dalla formulazione di Eulero della vis inertiae Newtoniana

$$ma = F$$

questa può essere riscritto nella forma:

$$F - ma = 0$$

e definendo un vettore inerzia  $I$  come:

$$I = -ma$$

ne segue:

$$F + I = 0$$

Nasce così un principio nuovo: presentando la meccanica in forma vettoriale, D'Alembert poté concepire la forza di inerzia come una forza da aggiungere o sottrarre alla somma vettoriale di tutte le forze agenti su un corpo. Egli non cercò di bandire il concetto newtoniano di forza, in quanto il suo principio si fondava proprio su di esso, ma non lo pose al centro dell'attenzione: nei suoi tre principi, la conservazione della forza viva non è uno di essi. D'Alembert ha distolto lo sguardo dalle cause motrici, per considerare esclusivamente il movimento che esse producono: ha rifiutato in questo modo le "forze intrinseche al corpo in movimento" cioè "le forze vive" designate come  $mv$  e  $mv^2$  (le idee di conservazione non sono quindi centrali). Attraverso la riduzione della dinamica alla statica, d'Alembert non era ancora pervenuto alla soluzione di problemi dinamici mediante metodi statici. Le equazioni risultanti erano equazioni differenziali e dovevano essere risolte, l'unico risultato ottenuto era la deduzione di queste equazioni, che ora sono di equilibrio.

### 2.3.3 Lagrange

Gli obiettivi che Lagrange si proponeva si esaurivano nell'ambito della matematica, dando definizioni superficiali di "forza" e "potenza" senza preoccuparsi troppo di che cosa

implicassero. Le forze in senso vettoriale hanno scarsa importanza nella sua opera che è scritta in linguaggio scalare. Lagrange derivò le sue famose equazioni dalle leggi di Newton (nella formulazione di Eulero) e facendo uso di una singola funzione scalare  $L = T - V$  (dove  $T$  è quella che noi chiamiamo energia cinetica e  $V$  energia potenziale, ed  $L$  è la funzione lagrangiana) che determina l'intera dinamica del problema in funzione del quale le equazioni furono formulate.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_n} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_n} = 0$$

Esse rappresentano un principio differenziale dell'energia. Lagrange vide subito la possibilità di dedurre da queste equazioni il principio di conservazione della forza viva, purché i vincoli fossero esenti da attrito e indipendenti dal tempo. Egli concentrò l'attenzione su queste nuove funzioni energetiche che, alla luce del concetto moderno di conservazione dell'energia meccanica, rappresentano l'energia cinetica e potenziale, mentre per i matematici del tempo si trattava dei vecchi concetti di "forza viva" e "funzione potenziale", che obbedivano a una legge di conservazione per il caso speciale di assenza di attrito e di costrizione dei vincoli indipendente dal tempo. Ciò apriva la via alla soluzione di molti problemi che i matematici del tempo disperavano di poter risolvere.

## 2.4 La conservazione dell'energia

L'Ottocento aveva ereditato nel campo della meccanica due tradizioni: la meccanica newtoniana vettoriale con l'accento sulle forze, e la formulazione della meccanica analitica con l'accento sulle quantità scalari di forza viva e funzione potenziale. La meccanica vettoriale, basata su spazio, tempo, massa e forza mirava a misurare l'azione di una forza attraverso la quantità di moto, il vantaggio era che le forze non conservative possono essere trattate, ma la trattazione risultava difficoltosa in presenza di vincoli. Al contrario la trattazione scalare si basa sui concetti di spazio, tempo, massa ed energia, è applicabile limitatamente a forze conservative e dipendenti solo dalla posizione, ma non dal tempo o dalla velocità. La generalità della trattazione scalare arriverà con Hamilton per il quale l'azione è definita come l'integrale della differenza tra energia cinetica e funzione lavoro: il moto che riverifica in natura è quello per il quale l'azione è minima (principio di minima

azione). Helmholtz non conosceva quest'opera, egli lavorava sulla formulazione di Lagrange e cercava di riconciliarla con la trattazione vettoriale delle forze. Egli, pur essendo un atomista, dovette riconoscere i vantaggi dell'impostazione analitica: i vincoli vengono trattati in modo facile ed elegante. La base concettuale dell'energia si fonda su due principi: il principio di conservazione dell'energia (conosciuto da Helmholtz) e quello di minima azione (sconosciuto ad Helmholtz) che infatti si interrogava sul fatto che il moto per sua natura possiede una direzione, e sembra quindi assurdo che due quantità scalari siano sufficienti a determinarlo

#### **2.4.1 Newton**

Nella storia della scienza c'è il mito diffuso che Newton avrebbe enunciato in modo quasi chiaro il principio di conservazione dell'energia. In realtà ciò non è giustificato in quanto, anche se la concezione newtoniana di forza è molto complessa, essa ha ben poco a che fare col concetto di energia.

Prima di considerare l'opera di Helmholtz, bisogna completare il quadro filosofico e la trattazione della teoria del calore

## **2.5 Il calore e l'energia**

### **2.5.1 Le due leggi della termodinamica**

Storicamente il concetto di energia nel suo senso moderno sorse dopo la formulazione del principio di conservazione. La formulazione di questo principio condusse alla scienza dell'energetica, intrisa di metafisica, mentre la termodinamica ebbe inizio su scala più modesta e rappresenta uno dei pochi ambiti della fisica che non è stato scosso dagli sviluppi del XX secolo. La termodinamica dei processi reversibili, trattati all'epoca, non si applica ai processi vitali. Gli sviluppi più recenti in questo settore sono consistiti nel rendere possibile una descrizione quantitativa di processi irreversibili sostituendo alle uguaglianze delle disuguaglianze. La termodinamica si occupa principalmente di fenomeni macroscopici e il suo compito è quello di descrivere il mondo in termini derivati da questi fenomeni. Come "sistema termodinamico" si intende una parte di "mondo" isolata artificialmente in condizioni sperimentali controllate. Se un sistema adiabatico

viene sottoposto all'azione di forze esterne, ad esempio la pressione  $P$ , e in conseguenza della sua applicazione il volume muta di una quantità  $dV$ , il lavoro compiuto sarà:

$$dW = PdV$$

E' provato sperimentalmente (in origine con gli esperimenti di Joule sull'equivalenza tra calore e lavoro meccanico) che il lavoro  $W_{12}$  che si accompagna a una transizione di un sistema adiabatico da uno stato a un altro è indipendente dalla via fisica seguita. Nel caso prima visto  $W_{12}$  non dipende dai valori intermedi assunti da  $P$ :

$$W_{12} = \int_1^2 Pdv$$

Le considerazioni concernenti un sistema adiabatico possono essere generalizzate in modo da comprendere un sistema chiuso separato da un serbatoio di calore per mezzo di una parete diatermica. Se ora richiudiamo il serbatoio di calore e il sistema all'interno di una parete adiabatica, possiamo assegnare all'intero sistema (sistema chiuso più serbatoio) un'energia interna  $U$  che è la somma dell'energia interna del sistema chiuso  $A$ , ossia  $U_A$ , e dell'energia interna del serbatoio di calore  $U_B$ . Come visto il lavoro totale eseguito  $W$  è indipendente dal percorso, quindi esiste una funzione potenziale (energia interna) di stato il cui decremento differenziale rappresenta l'elemento di lavoro. E' questa quella che abbiamo designato come energia interna e si ha:

$$dU_A = -dU_B - dW$$

Poiché l'intero sistema è adiabatico, la diminuzione di energia in  $B$  deve essere dovuta a trasporto di energia da  $B$  ad  $A$ . Quest'energia trasportata è calore e viene designata con  $Q$ . Così in questo caso abbiamo  $dQ = dW_B$  e otteniamo:

$$dU_A = dQ - dW$$

E' questa la formulazione della prima legge della termodinamica così come fu espressa da Helmholtz ed è ancora valida anche nei processi relativistici e di meccanica quantistica. Questa legge implica l'impossibilità di un moto perpetuo e la reciproca convertibilità di ogni forma di energia, ma non esclude processi impossibili in natura (moto perpetuo di seconda specie) e non tiene conto che i processi naturali presentano una proprietà direzionale. Mentre i processi idealizzati sono pienamente reversibili, i processi naturali

procedono sempre verso uno stato di equilibrio. Si può quindi dire che i processi spontanei dissipano la loro potenza di moto, fenomeno designato da Thomson come “dissipazione di energia” e che occupò Clausius per molti anni. Di questa proprietà dei processi naturali ne fu tenuto conto in una delle numerose formulazioni della seconda legge della termodinamica di lord Kelvin per il quale *E' impossibile derivare un effetto meccanico da una parte qualsiasi di materia raffreddandola al di sotto della temperatura del più freddo fra gli oggetti circostanti.* Clausius formulò questa legge in modo alternativo: *E' impossibile costruire un dispositivo che operando in un ciclo non produca altro effetto oltre al trasferimento di calore da un corpo freddo ad uno più caldo.* La seconda legge è posteriore alla prima (conservazione dell'energia) e fu scoperta da Sadi Carnot (1830). Nel secolo scorso i fisici non si accorsero che la termodinamica è una teoria più generale della meccanica e tentarono di ridurre le due leggi fondamentali della termodinamica alle leggi della meccanica, ma questi tentativi fallirono e nacque la termodinamica come scienza autonoma. C'era una legge di conservazione dell'energia meccanica (formulata per la prima volta da Huygens e Leibniz), mentre verso la fine del '700 la teoria del flogisto venne sostituita da quella del calorico che a sua volta impose ostacoli alla teoria meccanica del calore, ultimo passo necessario per la formulazione generale del principio di conservazione. Rumford e Davy sostennero che il calore fosse movimento e lo dimostrarono in modo conclusivo sperimentalmente. Dal punto di vista logico, la dimostrazione segue il percorso: il calore è movimento, il movimento è energia cinetica, la somma di energia cinetica e potenziale è una costante e così si stabilì la prima legge della termodinamica. Bisogna però precisare che i concetti non emergono mai in una forma logica e che il concetto (di energia) che scaturisce da una formulazione (principio di conservazione) non coincide col concetto col quale lo scopritore di tale legge stava lavorando prima della formulazione. Il concetto del calorico di Carnot è una delle tappe che condusse al concetto di energia. Bisogna capire quali fenomeni fisici fossero spiegati dalla teoria del calorico e quali invece dalla teoria dinamica del calore. Non esiste una connessione diretta tra teoria dinamica del calore ed il principio di conservazione: bisogna quindi studiare separatamente le varie idee di conservazione e le relazioni fra di esse nelle

varie epoche. Ci fu la legge meccanica di conservazione della forza viva e dell'energia potenziale, coi suoi vantaggi e le sue limitazioni, vi fu una frattura tra la scienza meccanica teorica e la scienza sperimentale. Non vi fu tentativo di unificare questi campi, che avvenne invece dopo la fondazione della scienza generale della termodinamica portando all'unità di tutti i fenomeni naturali. L'eredità lasciata dalla teoria fisica del calore passa attraverso la teoria del calorico al tempo di Lavoisier, e attraverso la posizione fisica e filosofica di Rumford e Davy.

### **2.5.2 La teoria dinamica del calore**

La vecchia teoria sulla natura del calore era quella dinamica e i suoi rappresentanti principali erano Bacone, Boyle, Hooke e Locke. A un livello completamente diverso era la concezione leibniziana del calore come moto, teoria diffusa soprattutto sul continente. La vecchia teoria dinamica non era stata presa molto sul serio dai fisici sino alla fine del Settecento quando Rumford e Davy cominciarono a fare esperimenti. Secondo Locke *“il calore è un'agitazione molto vivace delle parti insensibili dell'oggetto; tale agitazione produce in noi quella sensazione in conseguenza della quale denominiamo caldo l'oggetto”*. Tale teoria però non soddisfaceva i fisici e i chimici che ambivano a una teoria che si applicasse all'espansione dovuta al calore, ai cambiamenti di stato e ai composti chimici e alle reazioni chimiche e si doveva conciliare con la teoria corpuscolare che godeva ormai di vasta accettazione. Ne seguì la teoria del calorico che essendo stata proposta da Lavoisier ebbe un enorme potere di spiegazione, ma impedì l'unificazione della teoria atomica in fisica con la nuova teoria chimica, unificazione necessaria alla connessione tra energia meccanica e fenomeni del calore.

### **2.5.3 La teoria del calorico**

Per la massima parte del Settecento le teorie materiale e dinamica del calore godettero di uguale popolarità. Nessuna di esse era però suffragata da prove sperimentali e entrambe conservarono la fedeltà dei propri sostenitori facendo leva su ragioni filosofiche o tradizionali, poiché nessuna delle due fu una teoria fisica quantitativa. Tale situazione riflette il ristagno dello sviluppo della chimica. La svolta viene dalla ripresa dell'inventività ad opera della nuova scienza chimica (connessa col perfezionamento della

nuova teoria materiale del calore). Grazie a Lavoisier fu fatto un serio tentativo di spiegare tutti i fenomeni del calore nei termini di un fluido elastico o "fluido igneo", anche se sottolineava che la sua teoria del calore era soltanto un'ipotesi plausibile. Lavoisier usò la parola "calorico" per designare un fluido le cui particelle erano autorepulsive il che controbilanciava la loro attrazione gravitazionale e impediva il collasso di tutti i corpi in una massa solida omogenea sotto l'effetto della gravitazione. Questo modello forniva una soluzione a problemi come l'espansione in seguito a riscaldamento e la contrazione in seguito a raffreddamento. Secondo questa teoria ogni atomo è circondato da una nube di calorico più o meno denso la cui densità diminuisce col raggio più rapidamente dell'attrazione gravitazionale ed è pertanto rispetto ad essa una forza a breve raggio. I fisici dell'epoca erano divisi sulla natura del calore: per molti era un fluido diffuso nella natura che penetra i corpi, per molti era l'effetto di movimenti delle molecole della materia. Successivamente altre due scoperte si accordarono bene con la teoria del calorico. La prima fu la dimostrazione di Laplace e Lavoisier che le capacità termiche specifiche non sono costanti ma funzione della temperatura: anche se non era una dimostrazione della teoria del calorico, si accordava bene con essa poiché in questa teoria la densità della nube di calorico intorno all'atomo è funzione della temperatura. La seconda fu quando Dulong e Petit predissero che l'espansione di un corpo a seguito di somministrazione di calore non dovesse essere una funzione uniforme della temperatura, ma che dovesse piuttosto aumentare con essa e anche questa conclusione si accordava perfettamente con la teoria del calorico. Il calore latente fu spiegato come combinazione chimica tra materia e materia del calore. La teoria del calorico aveva un grande potere di spiegazione che copriva la massima parte dei fenomeni noti a quell'epoca. Essa però non spiegava come l'attrito potesse "eccitare" calore, secondo l'espressione usata da Rumford, e si trovava in difficoltà anche sulle teorie dell'irraggiamento, anche se questi fenomeni acquistarono importanza solo cinquant'anni dopo e nel frattempo si era imposta la teoria del calorico.

#### **2.5.4 Il conte Rumford**

L'intera carriera scientifica del conte Rumford (Benjamin Thompson) fu dedicata alla ricerca della vera natura del calore a favore di una teoria secondo cui il calore risiederebbe



nel moto vibratorio delle particelle materiali. La teoria che voleva verificare era dunque la teoria cinetica del calore.

Nella conferenza tenuta alla Royal Society nel 1798 disse che *“essendo impegnato nel controllo dell'alesatura dei cannoni dell'arsenale militare a Monaco di Baviera, fui colpito dal grado davvero considerevole di calore che un cannone di ottone acquista in breve tempo durante l'alesatura e dal calore ancora più intenso dei frammenti metallici che l'alesatura ne stacca. Quanto più meditai su questi fenomeni, tanto più essi mi sembravano curiosi e interessanti. Mi convinsi che un'investigazione approfondita avrebbe permesso di gettare maggior luce sulla natura recondita del calore e di formare una qualche ragionevole congettura sull'esistenza o inesistenza di un fluido igneo...”*. Egli innanzitutto desiderava sapere da dove arrivava il calore che si produceva nell'operazione meccanica e se le dottrine moderne del calorico potevano studiare tale fenomeno. Secondo la teoria del calorico le capacità di calore delle parti così ridotte in trucioli di metallo avrebbero dovuto subire una mutazione tale da rendere ragione di tutto il calore prodotto (avrebbero dovuto ridursi sensibilmente), ma da verifica sperimentale la capacità termica dei trucioli non era mutata, doveva quindi esistere una sorgente di calore diversa. La sua conclusione fu che *“il calore generato o eccitato in questi esperimenti non fu fornito a spese del calore latente o calorico combinato del metallo...”*.

Dopo aver controllato se l'aria non contribuisca in un qualche modo alla generazione del calore eccitato, ne concluse che la spiegazione di tutti questi fenomeni non si trova nel calorico, considerato anche *“la circostanza ... che la sorgente del calore generato per attrito, in questi esperimenti, appariva manifestamente inesauribile”*. Ne seguiva quindi la convinzione che ciò che un corpo può fornire senza limitazione non può essere una sostanza materiale, ma non può che trattarsi che di un moto. Di questo brano è importante la conclusione ma anche l'inizio che dimostra come Rumford non avesse in mente idee di conservazione cosicché l'intero problema dell'equivalenza di energia non fu mai posto. Ripetendo i suoi esperimenti per anni Rumford arrivò alla conclusione che il calore può essere prodotto in quantità inesauribile per attrito o per percussione e che non esistesse alcun fluido igneo e che il calorico non ha un'esistenza reale. Arrivò inoltre alla conclusione che per spiegare il trasporto di calore in un fluido non c'era alcun bisogno del calorico dimostrando che il

moto del liquido stesso era responsabile del trasporto del calore e che se le correnti di convezione si fossero arrestate il fluido avrebbe agito come un isolante e compì importanti ricerche sulla teoria dell'irraggiamento sia calorifico che frigorifico.

### 2.5.5 La teoria dinamica di Humphry Davy

Humphry Davy fu scienziato da laboratorio e filosofo e fu nel mondo scientifico di inizio Ottocento una figura dominante portando la chimica a una nuova dignità in Inghilterra. Trasformò la Royal Institution in un centro prospero e in uno strumento per l'istruzione popolare, viaggiò molto sul continente dove diffuse la fama della scienza inglese creando per la prima volta un'atmosfera internazionale nella scienza. Il suo contributo spesso citato alla teoria dinamica del calore è il suo saggio del 1799 *An Essay on Heat, Light and the Combinations of Light* dove afferma in termini inequivocabili che il calore non è una sostanza materiale bensì una forma di moto attingendo questa convinzione da Bacone ritenendo di averlo dimostrato sperimentalmente. In realtà, essendo una delle sue prime opere l'Essay è scritto senza un adeguato background scientifico sulla base dell'accettazione aprioristica che il calore è una forma di moto, con prove sperimentali del tutto inattendibili e inoltre col passare del tempo lo stesso Davy espresse dubbi sul valore dei suoi primi contributi divenendo sempre più possibilista sulla teoria del calorico fino a quando fra il 1820 e il 1830 non considerò più la questione risolta in un modo o nell'altro. La sua teoria si basa sul seguente esperimento sul ghiaccio: due blocchi di ghiaccio a  $-1.6^{\circ}\text{C}$  portati a sfregamento producono acqua a  $1.7^{\circ}\text{C}$ . L'aumento di temperatura non può derivare dalla diminuzione della capacità (la capacità di calore dell'acqua è molto maggiore del ghiaccio), e deve quindi derivare da una quantità di calore aggiunta attinta dallo sfregamento dei due corpi. Rumford venne a conoscenza degli studi di Davy e li utilizzò assieme ai propri sulla generazione di calore per attrito per dimostrare l'inesistenza del calorico. Per quanto riguarda la storia del termine energia, Aristotele usa il termine *energheia* nel senso letterario di energia mentale e nel senso tecnico in contrapposizione a *dynamis*, Thomas Young, contemporaneo di Davy, usò per primo questo termine tecnico per battezzare la vis viva di Leibniz; Davy non adottò l'uso tecnico della parola energia, ma la usò spesso lasciandola vaga

### 2.5.6 Carnot: la seconda legge della termodinamica

Sadi Carnot ha scoperto la seconda legge della termodinamica, ha introdotto il processo ciclico e riconosciuto l'importanza dei processi reversibili. Sadi Carnot pubblicò la sua opera fondamentale *Réflexions sur la puissance motrice du feu* a Parigi nel 1824. In questo saggio oltre ai termini *chaleur* e *feu* troviamo l'espressione *calorique*. Questi sono i concetti fondamentali di cui si avvale Carnot per pervenire al suo teorema che è una delle numerose formulazioni equivalenti della seconda legge della termodinamica. Il modello su cui Carnot lavora è la teoria del calorico (il suo calorico coincide con quello di Lavoisier) e benché egli esegua spesso confronti fra il lavoro della sua macchina fra due temperature e la caduta di un corpo da un'altezza a un'altra, non si rileva alcuna chiara indicazione di alcun tipo di conservazione. L'idea centrale dell'opera di Carnot è che dovunque esista una differenza di temperatura è possibile produrre potenza meccanica. *“La produzione di potenza motrice nelle macchine a vapore è dovuta quindi non a un consumo reale di calorico bensì al suo trasporto da un corpo caldo a un corpo freddo...”*. Molti passi del suo trattato sono riferiti all'idea di *“equilibrio del calorico”* che non è un concetto tratto dalla teoria dinamica del calore, anche se in realtà alcuni passi delle sue opere rivelano come egli ritenga inspiegabili molti fatti sperimentali alla luce della teoria del calorico. Carnot morì a trentasei anni nel 1832; nel 1878 il fratello inviò all'Académie des Sciences una *Lettre* con allegate alcune note inedite del fratello contenenti seri mutamenti nelle sue convinzioni: in esse c'è un passaggio chiaramente formulato alla teoria dinamica del calore e una formulazione quasi altrettanto chiara del principio di conservazione dell'energia. Anche Carnot menziona l'impossibilità di una macchina del moto perpetuo, ma come avvenne vent'anni dopo per Helmholtz, questa resta una condizione necessaria e non sufficiente per la formulazione del principio di conservazione. Egli conosceva le opere di Rumford e Davy e il lavoro che era stato compiuto nel campo della meccanica (la conservazione della vis viva) ed il carattere generale della trattazione matematica della meccanica. Se fosse stato assolutamente certo della teoria dinamica del calore e se fosse vissuto abbastanza per compiere gli esperimenti da lui proposti al fine di verificare l'equivalenza calore-lavoro, avrebbe potuto scoprire la termodinamica. Secondo Plank,

Carnot si occupò dell'unico elemento mancante a tutte le teorie di conservazione precedenti: nulla può andare perduto senza che si guadagni qualcosa.

## 2.6 Helmholtz

Helmholtz era un medico, e si occupò di calore animale, si occupò di teoria del calorico e di teoria meccanica del calore (che considera corretta sebbene incompleta), cercò di ridurre i processi vitali alla fisica e la fisica alla meccanica. La sua opera *Sulla conservazione della forza* fu scritta per soddisfare ad esigenze di fisiologia. Egli accettò la teoria di una forza vitale dell'epoca, che cercava di ridurre i fenomeni biologici a processi fisico-chimici pur conservando una forza vitale non specificata ed era convinto della sua conservazione. Elkana ritiene che solo Helmholtz descrisse per la prima volta il principio di conservazione in tutta la sua generalità, rendendolo accettabile a tutta la comunità scientifica. Una condizione necessaria a tale principio è la disponibilità dei processi di conversione: nel 1850 erano disponibili i processi di conversione da più di 50 anni: dopo Carnot era chiaro che gran parte del lavoro poteva essere trasformato in calore, le misurazioni esatte di Joule (mai generalizzate a tutti i fenomeni della fisica) erano pubblicate su riviste scientifiche. Coloro che facevano un lavoro sperimentale non avevano idee di conservazione radicate, oppure mancava un approccio matematico, mentre coloro che aderivano al principio di conservazione, credevano nella conservazione di una entità chiamata forza. Solo dopo che Helmholtz ebbe dimostrato il principio matematicamente, con argomentazioni di ordine dimensionale, divenne chiaro che cosa fosse la forza che si conservava. All'inizio del 1800 si conosceva chiaramente la funzione potenziale: tutte le forze sono tali che, considerato un punto  $P$ , l'effetto in una direzione è espresso dal differenziale parziale di una funzione delle coordinate di  $P$  nello spazio, chiamata funzione potenziale. Nel 1853 Rankine introdusse l'espressione energia potenziale in contrapposizione all'energia attuale di Thomson (ultimo residuo aristotelico), dopo il 1870 il concetto di potenziale è usato come lavoro per muovere un carico unitario in verso contrario al campo di forza. La storia dell'energia cinetica è più breve: l'espressione fu introdotta da lord Kelvin nel 1880, ma si deve a Leibniz il principio di conservazione della

vis viva. Helmholtz nella sua opera *Sulla conservazione della forza* usa il termine Kraft (forza) in modo ambiguo: nella prima parte parla della conservazione della vis viva, dà per scontata l'impossibilità di produrre forza motrice dal nulla. Cita le misurazioni di Joule, esamina fino a che punto il calore possa corrispondere ad un equivalente meccanico e tratta la teoria sul calore: *la quantità di calore potrebbe servire per espressione della quantità di forza viva del movimento termico e in secondo luogo della quantità di quelle forze elastiche degli atomi che cambiando la loro disposizione possiedono tale movimento termico; la prima parte corrisponde al calore latente*. Egli si occupa per primo dell'equivalente meccanico dei processi elettrici, di come l'aumento di forza viva debba considerarsi uguale alla differenza di potenziale alla fine della traiettoria rispetto al potenziale dell'inizio. Gli assunti alla base della teoria di Helmholtz sono:

- a. tutti i fenomeni fisici sono riconducibili a processi meccanici
- b. in natura deve esistere una entità fondamentale che si conserva

Mentre il processo logico che egli seguì è il seguente:

- la forza newtoniana è un concetto fondamentale della meccanica
- il concetto fondamentale della fisiologia è la forza vitale, la fisiologia è riconducibile alla fisica, ossia alla meccanica
- in natura c'è una entità fondamentale che si conserva, deve essere la *kraft*
- la formulazione lagrangiana della meccanica è equivalente dal punto di vista matematico-concettuale alla formulazione Newtoniana: la formulazione lagrangiana ha per entità fondamentale energia cinetica più energia potenziale che si conserva
- conclusione: l'entità fondamentale *kraft* che si conserva in natura deve essere equivalente per dimensione e forma all'energia meccanica: ecco il principio di conservazione dell'energia generalizzato. La parola *kraft* passò a significare energia. Elkana non considera l'impossibilità del moto perpetuo come una premessa di Helmholtz anche se tale nozione gli era chiara (era nota da circa 50 anni). Per Helmholtz il vero significato dell'impossibilità del moto perpetuo è che la conservazione dell'energia la deve necessariamente implicare. Plank interpretò

correttamente Helmholtz e scrisse che il concetto di energia acquista significato solo attraverso il principio di conservazione.

## 2.7 Conclusioni

Elkana sostiene nel libro “La scoperta della conservazione dell’energia” non sia un caso di scoperta multipla, ma che tra il 1840 e 1870 gruppi diversi di scienziati, in luoghi diversi, stavano ponendosi problemi diversi venendone a capo con risposte diverse. Le risposte risultarono connesse fra il 1860 e il 1870 e logicamente derivabili l’una dall’altra. Nella prima metà dell’800 c’erano varie tendenze con uno sviluppo parallelo:

- un interesse utilitaristico per le macchine condusse a migliorarne le prestazioni e i ricercatori furono portati a chiedersi se fosse corretta la teoria del calorico o quella dinamica
- un atteggiamento filosofico che richiamò l’attenzione sulle forze della natura e sulla reciproca convertibilità e conservazione
- la ricerca fisiologica esigeva di capire se i fenomeni vitali fossero governati da leggi fisiche
- gli sviluppi matematici nel campo della meccanica razionale spinsero verso la dimostrazione dell’equivalenza tra meccanica vettoriale sviluppata da Newton e dai suoi seguaci inglesi e quella scalare sviluppata nel continente da Eulero e Lagrange.

Il risultato fu la consapevolezza dell’analisi dimensionale: le forze che sono convertibili devono avere le stesse dimensioni. In aggiunta le condizioni socio-politiche dell’Europa dell’800 erano tali che stava nascendo un nuovo tema religioso: la religione istituzionale era stata screditata dopo Darwin e si preparava il terreno per una nuova fede nei grandi principi universali: uno di essi fu il principio di conservazione dell’energia. Nell’universo c’è qualcosa di immutabile in cui l’organico si cambia con l’inorganico. Storicamente avvennero due sviluppi paralleli in Inghilterra ed in Germania: il gruppo Inglese che ebbe origine con Joule si occupava di rendimento nella conversione tra potenze meccaniche, ed il loro lavoro condusse alla dimostrazione che il calore è una forma di moto. Il tedesco Helmholtz si occupava di problemi fisiologici del calore animale e condusse alla

formulazione del principio di conservazione matematicamente dimostrato sulla base di un'analisi dimensionale.

### 3 Evoluzione concettuale e storica secondo Haas

La natura del principio di conservazione, se sia un utile modello matematico, una proprietà reale della natura scoperta sperimentalmente, la traduzione di una nostra esigenza filosofica, non può essere chiarita in modo univoco, perché sicuramente concorrono tutti gli aspetti. Come rileva **Haas** [6], una risposta può venire solo da un'analisi storica, che ricostruisca non solo la cronologia delle diverse concezioni e formulazioni dell'energia e della sua conservazione, ma riconosca in essa l'evoluzione concettuale del principio, individuando gli altri principi e concezioni filosofiche che ne sono premessa, gli esperimenti che ne sono giustificazione, legandoli allo sviluppo degli strumenti matematici che hanno consentito una formulazione sempre meno ambigua, e allo sviluppo tecnologico che è stato da una parte stimolo alla ricerca e dall'altra ha aumentato le osservazioni sperimentali su cui ragionare.

Dal punto di vista concettuale, si possono individuare tre principi come premessa a quello di conservazione dell'energia: la ricerca del permanente nell'apparente variabilità caotica dei fenomeni, la convinzione che la molteplicità dei fenomeni si possa ricondurre a un'unità, e l'idea di compensazione che permette di applicare i primi due principi quando sembrano non valere.

L'idea della PERMANENZA si declina inizialmente nella vaga idea di conservazione della sostanza, che si chiarisce successivamente nella conservazione della materia e del suo stato di moto. Si può vedere nella prima un principio fondamentale della chimica, e nella seconda la premessa del principio di conservazione dell'energia, cioè un principio fondamentale della fisica. L'idea di costanza della materia è presente già in diversi autori greci, soprattutto nella formulazione secondo cui *nulla si crea dal nulla*, enunciata esplicitamente dalla scuola eleatica (ad esempio in **Melisso**), e riconoscibile in **Platone**, che parla di un Ordinatore più che di un Creatore del mondo. La formulazione

complementare, *niente scompare nel nulla*, è concettualmente più difficile perché per spiegare le osservazioni richiede l'idea di compensazione, che porta a dire che quello che sembra scomparso (la materia o il suo stato) si è trasformato in "qualcosa" di qualitativamente diverso, ma quantitativamente uguale. Tuttavia anche questa seconda formulazione è presente nella filosofia greca, ad esempio in **Empedocle** e in **Anassagora** (che esprime la sintesi di entrambi: nulla si crea e nulla si distrugge); gli atomisti, come **Democrito** ed **Epicuro**, cercano una spiegazione nel fatto che il mondo sia composto di atomi in movimento e indistruttibili, e nella considerazione che "altrimenti tutto potrebbe derivare da tutto", sottintendendo un legame tra permanenza e unità. Le idee degli atomisti verranno abbandonate fino all'età moderna, quando verranno riprese ad esempio da **Lavoisier** che dà la prima formulazione precisa della costanza della materia come conservazione della massa, rendendolo un principio fisico perché quantitativo e verificabile. L'idea originaria di conservazione della sostanza è però più ampia, e alla conservazione della materia si affianca anche quella del suo movimento. Questa idea porterà alla legge d'inerzia, ed è alimentata dalla concezione aristotelica della separazione tra mondo terrestre e i cieli, e della perfezione, e quindi eternità e indistruttibilità, degli eventi astronomici. D'altra parte la visione aristotelica richiedeva un motore primo e negava il vuoto, quindi ha contribuito a rifiutare la concezione atomistica con le sue implicazioni di unità della causa di tutti i fenomeni e della composizione di tutte le cose, e di necessità di una compensazione. Quindi la filosofia greca prevalente ha in parte rallentato in parte stimolato la formulazione del principio d'inerzia, premessa a quello di conservazione dell'energia, di cui può essere considerato il più semplice caso particolare. La legge d'inerzia viene concepita nel XVI secolo e formulata compiutamente da **Galileo**. La sua generalizzazione richiede fortemente il concetto di COMPENSAZIONE, come mostrano bene le opinioni di diversi autori del tempo. **Cartesio** ne dà una formulazione in termini di conservazione della quantità di moto, evidenziando l'esigenza di quantificare ciò che qualitativamente può variare ma numericamente si conserva. L'idea che questo, insieme alla conservazione della materia, sia un principio generale, è ben esposto da **Hooke**, secondo cui "tutto è materia e movimento". Tuttavia la legge, come enunciata da



Cartesio, non è esente da problemi. **Voltaire** solleva il problema del movimento degli animali, che sembra potersi originare senza alcuna compensazione, **Newton** quello dell'attrito, che sembra indicare che la quantità di moto totale dell'universo sia in diminuzione. La conservazione del moto non esclude inoltre l'esigenza di trovare una causa prima alla quantità di moto presente, individuata da Cartesio e Spinoza in Dio. Il tentativo di superare questi problemi porta **Leibniz** a modificare la formulazione di Cartesio, individuando nella forza viva, anziché nella quantità di moto, la quantità che si conserva. L'idea della conservazione della forza è per Leibniz un apriori, che dovrebbe sostituire l'esigenza di una causa esterna metafisica al moto.

E' il caso di sottolineare a questo punto come in età moderna lo studio della questione abbia assunto i connotati scientifici moderni, e come quindi le teorie proposte vengano legate a esperimenti più o meno quantitativi; tuttavia, i concetti di forza e di energia non sono ancora definiti in modo univoco, si può dire anzi che l'energia riceva una definizione chiara solo al momento della formulazione definitiva della legge della sua conservazione, a metà '800. E' chiaro quindi che non si tratta solo di pensare e realizzare esperimenti che verifichino che in ogni situazione una grandezza già nota si conservi, ma di sviluppare parallelamente i concetti e le loro relazioni; in questo quadro ricerca sperimentale in senso moderno e filosofia sono inevitabilmente intrecciate.

La teoria di Leibniz si applica inizialmente solo agli urti elastici. La sua estensione a tutti i tipi di urto richiede l'emergere e l'accettazione di tre idee: l'esistenza di forze latenti, che consente alla compensazione di avvenire in tempi diversi, e che porterà alla nascita dell'idea di energia potenziale; l'impossibilità del moto perpetuo, che rende evidente come le variazioni di moto in un sistema richiedano dispendio di energia da parte di un altro sistema, e che l'energia non si può creare dal nulla; l'uguaglianza tra causa ed effetto, cioè la possibilità di descrivere con la stessa grandezza fisica stati qualitativamente diversi.

Un approfondimento merita la questione del moto perpetuo, perché l'affermazione della sua impossibilità ha permesso di chiarire le leggi della meccanica e di cominciare ad avere un principio abbastanza generale da cui dedurre diverse leggi fisiche. L'impossibilità del moto perpetuo è riconosciuta da diversi autori del XV e XVI secolo, ma non viene usata

per giustificare la conservazione dell'energia, anzi viene vista come sua confutazione. E' evidente la separazione, già osservata, tra le due idee, "nulla si crea dal nulla" e "nulla scompare nel nulla", che sono due facce dell'idea "nulla si crea e nulla si distrugge" ma che sono bene separate, anche cronologicamente. Se era infatti già affermata l'idea della non creabilità della forza, non era così scontata la sua conservazione. Nel caso del moto perpetuo, l'idea di origine aristotelica che il perdurare di un moto richieda una forza porta a credere che l'impossibilità di un moto eterno significhi una perdita di forza. Con lo sviluppo della meccanica si riconosce che un moto perpetuo richiederebbe produzione di forza, che dovrebbe compensare la dissipazione o produrre la variazione del moto rispetto al suo perdurare naturale. Si vede quindi chiaramente come il percorso che porta a chiarire e generalizzare la conservazione dell'energia sia strettamente collegato e contemporaneo alla migliore definizione dei concetti di forza ed energia. L'impossibilità del moto perpetuo è considerato come un assioma da molti fisici del tempo, quindi come evidente e che non necessita di dimostrazione, ma non mancano inventori che tentano di realizzare nella pratica macchine che producano più forza di quanta ne venga usata per mantenerle in funzione. Solo nel 1775 l'Accademia delle Scienze di Parigi decide di dare una dimostrazione dell'impossibilità di un motore perpetuo, per motivare la decisione di non accettare più lavori su macchine di questo tipo. Che sia un assioma o un teorema, la sua fecondità risulta evidente fin dalle sue prime formulazioni. Viene usato da **Stevin** per dedurre le leggi del piano inclinato, da **Huygens** per trovare la velocità di caduta dei gravi, da Carnot per dimostrare che il suo ciclo è indipendente dal gas usato, da **Roget** e **Faraday** per contestare la teoria del contatto di Volta. Gli stessi **Mayer** ed **Helmholtz**, che hanno portato a compimento la sintesi della conservazione dell'energia nella sua formulazione finale, dichiarano esplicitamente che l'impossibilità del moto perpetuo sia il punto di partenza per enunciare i teoremi di conservazione in meccanica e poi generalizzarli.

L'introduzione dell'idea di forza latente è un ulteriore passo fondamentale verso la generalizzazione finale. Si afferma l'idea che l'energia non si conservi solo per trasmissione da un tipo di moto a un altro, ma che possa essere "accumulata" e produrre

effetti in un secondo tempo, riuscendo così a spiegare il comportamento dei corpi elastici. Si distingue così tra una forza effettiva e una latente, premesse ai moderni concetti di energia cinetica e potenziale. Il primo a proporre questa idea è **Gassendi**, che riprendendo l'ipotesi atomistica vede negli atomi la sede della forza latente, e quindi in grado di "recuperare" un moto momentaneamente ostacolato da uno stato di quiete. La prima formulazione quantitativa si trova in **Leibniz**, che supera chiaramente la concezione di Cartesio secondo cui la quantità che si conserva è un'unica grandezza determinata, e dipendente dal moto ( $mv$  o  $mv^2$ ), ed esplicita che a conservarsi è la somma della forza attuale e di quella latente, introducendo quindi chiaramente la necessità di trovare delle leggi di trasformazioni da una forma di energia all'altra. **Bernoulli** estende il principio al di fuori della meccanica, attribuendo energia potenziale anche a fonti di calore, come il carbone combustibile.

Per questi autori la conservazione dell'energia è un assioma, legato alla forte convinzione, anche questa non dimostrata, che l'effetto uguagli la causa: se si perde dell'energia (la causa), la si deve ritrovare in un'altra forma quantitativamente uguale, perché deve aver provocato un effetto. Leibniz spiega l'impossibilità di avere un effetto maggiore della causa dall'impossibilità del moto perpetuo, e mostra come il principio di uguaglianza di causa ed effetto porti a enunciare la legge di Galileo secondo cui la velocità di arrivo non dipende dalla traiettoria ma solo dall'altezza di caduta, e quella di Huygens secondo cui la velocità di arrivo dopo una caduta da una certa altezza è uguale alla velocità necessaria per raggiungere la stessa altezza. Non ne dà mai però una dimostrazione completa, e non giustifica perché non si possa avere un effetto minore della causa.

Si è visto che l'indagine condotta finora porta a riconoscere che, se qualcosa si conserva, questo non può rimanere in un unico ambito (movimento, calore, correnti...) ma è necessario riconoscere una grandezza quantitativamente uguale che descrive forme qualitativamente differenti. E' necessario quindi trovare le leggi di trasformazione da una forma all'altra. Per fare questo, non è strettamente necessario, dal punto di vista logico, sostenere un'unità dei fenomeni fisici che consenta di ricondurre diversi rami della fisica a pochi oggetti e leggi fondamentali, da cui dedurre regole matematiche di trasformazione

tra energia associate a diversi tipi di forza. E' importante però osservare che storicamente è stata proprio la profonda convinzione nell'identità di tutti i fenomeni naturali, sviluppatasi nell'800, a dare l'impulso alla ricerca sperimentale e teorica nella direzione di unificare la descrizione di diversi ambiti della fisica in uno solo, e di cercare quindi fattori di conversione costanti tra una forma di energia e l'altra. Nel '700 invece, proprio lo stato di maturazione della scienza, ormai dotata di strumenti matematici e metodologici sufficienti a rifiutare ogni ipotesi metafisica, ha rallentato la generalizzazione della conservazione dell'energia, considerata come teorema della meccanica con dei precisi limiti di validità (**d'Alembert**, **Lagrange**) e non più come esigenza filosofica legata alle idee di causa ed effetto, di creazione e distruzione.

L'idea di **UNITÀ** non è tuttavia nata nell'800. E' un bisogno dello studioso della natura quello di unificare la molteplicità dei fenomeni, presente nella storia fin dall'antichità. Si sviluppa in tre fasi, analogia, affinità, identità. L'analogia porta a descrivere allo stesso modo fenomeni diversi, senza necessariamente supporre una origine comune; ad esempio già nell'antichità si applicava la teoria degli urti alla descrizione del comportamento della luce. L'affinità vede nei diversi fenomeni non una descrizione, ma un principio comune: gli atomi in movimento di **Democrito**, l'etere come substrato unitario in **Cartesio** ed **Eulero**, la forza unica di **Boscovich**, l'unità della natura della naturphilosophie di **Schelling**. Il passo successivo è quello di ricondurre alcune parti della fisica ad altre, riconoscendo l'identità di esse. Già **Vitruvio** aveva ricondotto l'acustica alla meccanica; **Bacone** comincia a proporre una teoria cinetica del calore, sviluppata da Boyle, Hooke e Bernoulli, e dotata di una solida base sperimentale soprattutto a opera di **B. Thomson**; **Herschel** identifica il calore raggianti con la luce, **Ampère** propone una teoria che unifichi elettricità e magnetismo.

Dall'idea di unità segue concettualmente l'idea di **TRASFORMAZIONE**: se forze e comportamenti percepiti come diversi sono espressioni di un unico principio fondamentale, le diverse forme di energia devono potersi trasformare una nell'altra. Questa idea è stata sostenuta fortemente da **Faraday**, che ha dato un grande contributo a

fornirne una base sperimentale, e che per questo può essere considerato il padre del moderno concetto di energia.

Dopo il processo, già delineato, che ha portato a inizio '700 a formulare un'idea di energia in diverse forme trasformabili una nell'altra, quella associata al moto (la forza viva, corrispondente alla moderna energia cinetica), alla capacità di movimento (l'energia potenziale), e al calore, si ha un periodo di stallo, fino a fine '700, quando lo sviluppo della tecnica stimolato dalla rivoluzione industriale a sua volta stimola studi di meccanica e termodinamica. Un passo decisivo per l'unificazione è la definizione del lavoro da parte di **L. Carnot**, che permette di unificare le diverse forme di energia attraverso i loro effetti meccanici. Gli studi sperimentali di **B. Thomson** e teorici di **S. Carnot** contribuiscono ad abbandonare definitivamente la teoria del calorico e a sviluppare una teoria dinamica del calore, necessaria a una generalizzazione coerente del concetto di energia ai fenomeni termici. Il quadro viene completato da **Mayer** e **Joule** che determinano l'equivalente meccanico del calore, cioè determinano quantitativamente il fattore di conversione. Parallelamente, l'idea di unità viene confermata ed estesa dalla connessione tra luce e calore presentata da **Fresnel**, dalla scoperta degli effetti magnetici dell'elettricità da parte di Oersted, degli effetti del calore sull'elettricità e degli effetti termici delle correnti (**Seebeck** e **Peltier**), degli effetti elettrici del magnetismo da parte di **Faraday**. A metà '800 i tempi sono maturi per una sintesi, formulata in modo rigoroso e generale da **Helmholtz** nel suo saggio del 1847, "Sulla conservazione dell'energia".

L'analisi qui riassunta mostra che non ha senso alcuna discussione sulla paternità del principio di conservazione dell'energia, visto che la sua formulazione deriva da un lungo processo che ha richiesto i contributi del teorico matematico, dello sperimentatore e del filosofo.

## Confronto

Da un confronto dei due testi di Elkana e Haas si possono evidenziare alcune analogie e differenze.

*Impostazione.* L'impostazione generale è molto diversa. Elkana segue una struttura cronologica in cui individua i contributi dei diversi autori all'evoluzione concettuale del principio; Haas presenta un'analisi concettuale in cui di ogni concetto viene sviluppata l'evoluzione storica.

*Contenuti.* Mentre Haas parte dall'antichità nella sua ricostruzione storica e prende in considerazione tutta la fisica, Elkana parte dall'età moderna ('600) e si concentra quasi esclusivamente su meccanica e termodinamica.

*Natura del principio.* Entrambi gli autori sono concordi nell'individuare nella legge aspetti sperimentali, teorici, e apriori di origine filosofica.

*Formulazione finale del principio.* Entrambi concordano nell'attribuire ad Helmholtz la prima formulazione rigorosa della legge. Secondo Elkana non è un caso di scoperta multipla ma la sintesi a posteriori di teorie parallele e a volte contraddittorie. Haas invece ritiene che la connessione tra i vari contributi sia intrinseca; il processo di generalizzazione deriva quindi dal legame tra i concetti piuttosto che da un'interpretazione a posteriori. Inoltre, entrambi notano come solo con la formulazione finale si è dissipata la confusione tra forza ed energia, e si è affermata non solo la definizione, ma anche l'idea di energia in senso moderno.

*Moto perpetuo.* Elkana sottolinea che il riconoscimento dell'impossibilità del moto perpetuo, pur cronologicamente anteriore alla formulazione del principio della conservazione dell'energia, non lo implica, ma ne è una conseguenza logica. Haas evidenzia invece come lo stesso Helmholtz lo ponga come punto di partenza per la sua dimostrazione. Haas fa notare inoltre il suo ruolo centrale nel migliorare le leggi della meccanica e come sia il primo principio generale usato per dimostrare leggi particolari.

*Ruolo della tecnica.* Per Haas la rivoluzione industriale ha un ruolo non secondario nello sviluppo del principio di conservazione dell'energia, per lo stimolo venuto da essa allo

studio delle macchine, che ha dato contributi teorici e sperimentali sia alla meccanica sia alla termodinamica, in particolare la definizione di lavoro, grandezza che ha permesso di avere uno strumento matematico per unificare le diverse forme di energia attraverso le sue conseguenze meccaniche. Elkana non discute l'influenza tra tecnica e fisica, se non un breve accenno alle conseguenze industriali dello sviluppo della termodinamica.

*Ruolo della termodinamica.* Entrambi gli autori sono concordi nel dare importanza alla termologia nel processo di generalizzazione del principio, e a considerare necessario, per tale processo, il passaggio dalla teoria del calorico a quella dinamica. Nello specifico, hanno opinioni diverse a proposito del contributo di Rumford, che secondo Elkana non aveva nessun concetto di conservazione, essendo invece convinto che per attrito si potesse produrre calore in quantità inesauribile; secondo Haas invece aveva ben chiara l'idea di trasformazione tra movimento meccanico e calore, e la conservazione dell'energia generalizzata ai processi meccanici e termici. Concordano invece nel dire che Carnot era legato inizialmente alla teoria del calorico, e solo negli appunti postumi viene sviluppata una teoria dinamica che prevede trasformazione tra fenomeni meccanici e termici, e la conservazione dell'energia durante questi processi.

## **Bibliografia**

1. R. Feynman "La legge fisica", Bollati Boringhieri
2. R. Feynman "The Feynman Lectures on Physics", Addison-Wesley (2006) vol 1, cap 4
3. H. Poincaré "La scienza e l'ipotesi", Bompiani
4. M. Planck "Il principio di conservazione dell'energia", Lipsia (1887)
5. A. Einstein, L. Infeld "L'evoluzione della fisica", Bollati Boringhieri
6. A. E. Haas "La storia del principio di conservazione della forza", Università degli studi di Pavia (1990)
7. Y. Elkana "La scoperta della conservazione dell'energia", Feltrinelli (1983)

# Appendice

## Mapa dello sviluppo concettuale del principio secondo Haas

