

L'EVOLUZIONE DEL CONCETTO DI ENERGIA IN FISICA

Fabio Bevilacqua
Dipartimento di Fisica "A. Volta"
Università di Pavia

Cap.1 Il mito del *perpetuum mobile*

L'IDEA DI CONSERVAZIONE E LE ORIGINI DELLA SCIENZA OCCIDENTALE

L'evoluzione del concetto di energia è la storia dei tentativi di considerare l'invarianza come chiave per capire il cambiamento. La possibilità di comprendere il cambiamento viene quindi attribuita a ciò che durante il cambiamento stesso rimane invariato. Il concetto d'energia incarna così, in maniera eminente, il tipo d'intellegibilità che il filosofo francese delle scienze, Emile Meyerson, descrive come costituente l'obiettivo stesso dell'impresa scientifica: la riduzione del diverso ad un'identità più fondamentale, del cambiamento ad una permanenza profonda. Ancora oggi, nota Prigogine, è sul terreno dell'interpretazione del concetto di energia che si decide l'esito di quelle stesse antiche domande sui valori relativi della permanenza e del divenire.

E' la stessa scienza occidentale in realtà che nasce "dalla scoperta dell'identità nel mezzo della diversità". Invero l'idea che dietro il mondo mutevole che percepiamo c'è un ordine immutabile che non percepiamo immediatamente, che tutti i cambiamenti apparenti non sono che il ridisporsi in accordo a regole stabilite di elementi permanenti, segna l'inizio di una visione scientifica del mondo, in opposizione ad una visione soprannaturale, dove magia, animismo e capriccio avevano il sopravvento. In accordo a quest'ultimo punto di vista, tutto può accadere. Ogni cosa può essere trasformata in un'altra: uomini in animali, piombo in oro...e, secondo antichi racconti, questi eventi capitavano comunemente nel passato. Era la scienza moderna non ammette queste trasformazioni magiche, richiede un processo basato su regole ben definite, limita le possibilità e pertanto definisce un dominio di impossibilità.

Il primo cospicuo e ancor oggi fertile frutto di questa ricerca scientifica degli "invarianti" della natura fu la dottrina dell'indistruttibilità della materia, in particolare di quegli importanti elementi chiamati atomi. Fin dai tempi di Democrito (quinto secolo a.C.) datano due espressioni che saranno fondamentali per la nostra storia: "niente viene dal niente e niente può diventare niente"; Epicuro aggiungerà: "altrimenti tutto può venire fuori da tutto", e ritorneremo così in una concezione soprannaturale.

Con Epicuro l'idea di conservazione era entrata prepotentemente nel patrimonio filosofico:

Ed ora, secondo queste norme, dobbiamo procedere a considerare le verità che non cadono sotto i sensi. Ed anzitutto, che nulla s'origina dal nulla; perché ogni cosa nascerebbe da qualsiasi cosa, senza bisogno di alcun seme generatore. E se ciò che sparisce si dissolvesse nel nulla, tutte le cose

sarebbero ormai perite, perché, nelle singole dissoluzioni si sarebbe ridotta al nulla la materia che le costituiva....

Gli atomi poi, sono in continuo moto sempre (e gli uni cadono perpendicolarmente, gli altri declinano spontaneamente dal moto retto, gli altri rimbalzano per l'urto; di questi poi gli uni nel loro moto) divergono lontani fra loro, gli altri trattengono questo stesso rimbalzo, quando siano respinti dagli atomi che ad essi s'intrecciano, o quando sono contenuti da altri atomi fra loro intrecciati. E questo avviene, perché il vuoto che separa gli atomi gli uni dagli altri, non può, per la sua propria natura, opporre ostacolo alla loro caduta: e d'altra parte la loro insita solidità e durezza fa che urtati rimbalzino, finché l'intreccio atomico non li respinge indietro dal rimbalzo. Questi moti poi avvengono ab aeterno, perché eterni sono gli atomi ed il vuoto. (*Epistola ad Erodoto*)

Lucrezio, il cantore latino dell'atomismo greco, dedica alcuni versi memorabili del primo libro del *De Rerum Natura* a questa fondamentale concezione:

Nulla si crea dal nulla

Viene da ciò la paura che opprime gli uomini tutti: scorgono in cielo ed in terra prodursi vari fenomeni, fatti dei quali non possono scorgere punto le cause, e che riportano, quindi, alla potenza d'un dio. Ma se tocchiamo con mano che non può nascere nulla dal nulla, allora più chiaramente sapremo comprendere quello che andiamo indagando: donde ogni cosa si generi, e come ognuna si generi, senza che adoperi un dio.

Venga dal nulla potrebbe originarsi ogni specie da tutte le altre, nessuna abbisognerebbe d'un seme proprio. Potrebbero nascere dal mare gli uomini, i pesci squamosi uscir dalla terra, balzar dal cielo gli uccelli. Mandrie, animali domestici ed ogni sorta di belve, nascendo a caso, vivrebbero nei luoghi incolti e nei colti; nè porterebbe ogni pianta sempre i medesimi frutti, bensì diversi, e produrli tutti potrebbero tutte.

Se non vi fosse per ogni singola specie il suo germe, come si avrebbe un'origine certa e distinta per gli esseri? Ma perché viene ciascuno d'essi da un germe specifico si forman là, di là balzano fuori alla luce del giorno dove son insiti gli atomi loro e la loro materia; nè può ciascuno prodursi da ciascun seme, per questo che in ogni cosa v'è insito uno speciale potere.

Perché vedremmo prodursi di primavera la rosa, d'estate il grano, ed i grappoli quando li molce l'autunno, se non perché confluendo, al tempo giusto, certi atomi, erompe quanto si crea, mentre le acconce stagioni durano, e mette alla luce i delicati germogli, senza che corra pericolo, gonfia di vita, la terra?

Mentre, se nascon dal nulla, germoglierebbero a caso, qua, là, d'un tratto ed in epoche, anche, inadatte dell'anno, non esistendo alcun atomo che il clima avverso tenere dal fecondante connubio potrebbe a forza lontano.

Nè ci vorrebbe, d'altronde, posto che nascan dal nulla tempo, onde crescano gli esseri, all'aggregarsi degli atomi, ma in un solo punto i bambini diventerebbero adulti, e salirebbero, appena spuntati, gli alberi al cielo.

Ciò non avviene ma a poco a poco crescono gli esseri tutti, da un germe specifico, e nella crescita serbano inalterata la specie: se ne deduce che crescono e si alimentano di una propria materia. Nè senza le periodiche piogge potrebbe il suolo dischiudere i rigogliosi germogli: né, per il loro organismo, prive di cibo, potrebbero le creature animate perpetuare la specie e conservare la vita.

Non pensar dunque che senza i primordiali elementi qualcosa possa sussistere: pensa piuttosto, che, come le lettere alle parole, a molti corpi comuni sono molteplici semi. E poi, perché la natura non può crear dei giganti tali che guadino il mare e con le mani divellano le cime ai monti, e vivendo varchino i secoli interi, se non per essere data al divenir delle cose la quantità di materia che ne determina il limite? Va confessato, pertanto, che non può nascere nulla dal nulla, quando alle singole cose necessita un seme donde ciascuna si crei, e possa uscire alle miti auree dell'aria Ed infine, poiché val più coltivato che non

incolto il terreno, e reca, a chi lo lavora migliori frutti, è da credere vi sian nel suolo dei germi che dirompendo le fertili zolle, e volgendo col vomero la superficie della terra noi sprigioniamo alla vita: perché, se no, senza alcuna nostra fatica, spontaneamente vedremmo sbocciare più rigogliosi i germogli.

Nulla si distrugge

I corpi tutti ne' suoi atomi poi la natura se li dissolve di nuovo, non ne distrugge nessuno. Perché se fosse, una cosa, mortale in tutto e per tutto, ci sparirebbe, morendo, subitamente dagli occhi: a disgregarne le parti ed a dissolverne i nessi non ci vorrebbe l'azione d'alcuna forza. Ed invece, essendo eterni i principi onde si formano gli esseri, fino a che manchi la forza che a furia d'urti li sgretoli, o pei meati vi penetri dentro; e così li disgreghi, non può soffrir la natura che alcuno mai ne perisca. E se annientando totalmente la loro materia distrugge il tempo le cose che fa sparir per vecchiaia donde alla luce del sole potrebbe riportar Venere le varie specie animali, e, riportate, nutrirle ed allevarle la fertile terra porgendo a ciascuna, specie per specie, il suo cibo?

Donde le fresche sorgive ristorerebbero il mare e i fiumi che si dilungan di tanto? L'etere donde potrebbe pascere gli astri? Tutto, quant'è di mortale materia, il tempo infinito ormai trascorso, i millenni, dovrebbe averlo distrutto. Ma se per tutto quel tempo, per tante età son durati, sono i principi che formano questo universo, di certo, d'una immortale natura.

Non può perciò convertirsi cosa nessuna nel nulla.

Sarebbe, infine, la forza stessa la causa che estingue comunemente le cose, se la materia immortale non resistesse, qui meno, lì più legata ne' suoi nessi, in se stessa; e il contatto sarebbe causa di morte: ché, non constando le cose d'atomi non perituri, spezzar dovrebbe ogni minima forza la loro compagine. Ma perché, invece, è dissimile la coesione degli atomi e la materia immortale, restano intatte le cose nella struttura, fin che una forza non le urti bastantemente, adeguata alla testura di ognuna. Non dunque tornano al nulla le cose, ma, disgregandosi, tutte ritornano ad atomi della materia. Rovescia etere, il padre, alla madre terra la pioggia nel grembo: essa scompare, ma s'alzano lussureggianti le messi, e rinverdiscono agli alberi i rami, gli alberi crescono e si fan gravi di frutti. Di qui si nutre l'umano genere e il genere delle fiere: di qui le città fioriscono liete di bimbi, e le frondifere selve cantan, coi nuovi uccelletti, in ogni parte un sol canto: di qui spossati dal loro peso, si sdraian gli armenti nei lieti pascoli, e dalle poppe rigonfie distilla l'umor del candido latte, di qui per entro le tenere erbe, con membra malferme, lascivi ruzzano i redi inebriati di puro latte la mente novella.

Non ciò che sembra perire, dunque, perisce del tutto, perché rifa' la natura cosa da cosa, e non vuole ch'una ne nasca, se un'altra non la soccorra morendo.

La conservazione non era attribuita solo alla materia. Di fondamentale importanza per noi è che gli atomisti attribuivano eternità anche ai moti dei loro atomi, sebbene ovviamente non a ciascun moto individualmente. Anche il moto dunque fu concepito come qualcosa che potesse essere indefinitamente redistribuito, ma mai completamente annullato. Tutti i fenomeni dell'universo consistevano di redistribuzioni di materia-movimento. Una concezione che arriverà fino a Maxwell (Vedi *Matter and Motion*). Citiamo ancora Lucrezio:

Creazione continua

E non mai fu più compatta di adesso, nè con più grandi intervalli la massa

della materia, ch  nulla in essa si accresce, nulla si scema in natura.

Quindi quel moto medesimo che hanno ora, gli atomi semplici l'ebbero gi  per l' addietro, negli evi scorsi, e in futuro sempre saranno aggirati nella medesima guisa, e quanto   solito nascere rinascer  con l'identica sorte, e sar , crescer , avr  rigoglio pel tempo che ad ogni cosa   per legge della natura assegnato.

N  forza alcuna potrebbe alterar mai l'universo ch  non v'  luogo n  dove possa ritrarsi una parte della materia dal cosmo, n  donde sorgere e irrompere possa nel cosmo una forza nuova, e mutarne l'essenza tutta, e sconvolgerne i moti. E non ti deve stupire a tal riguardo che mentre son tutti gli atomi in moto, pure ci sembra che stia ferma la somma del tutto in una somma quiete, salvo se fa qualche cosa col proprio corpo alcun moto. E ci  perch , per natura, molto lontani son gli atomi dai nostri sensi, e invisibili.

Incontreremo ancora molto spesso questa doppia radice concettuale dell'idea di conservazione: nulla si crea e nulla si distrugge. Eppure i suoi legami con lo sviluppo e la formazione dei concetti di lavoro prima e di energia poi furono molto travagliati.

TENTATIVI DI COSTRUIRE IL MOTORE PERPETUO

Ne   prova il fatto che per molti secoli numerosi pensatori dedicarono risorse intellettuali e finanziarie al tentativo di trovare una macchina che potesse fornire una continua prestazione di lavoro senza una corrispondente compensazione. Essi credevano ci  nella possibilit  di un *perpetuum mobile* (che non vuol dire moto perpetuo ma motore perpetuo).

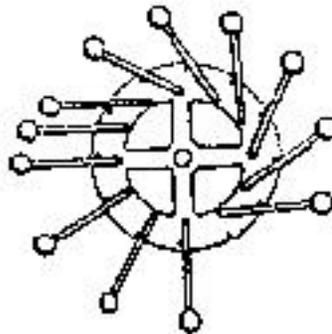


Fig .1 tentativo di motore perpetuo

Tali tentativi oggi sembrano ridicoli, essi invece furono estremamente importanti: anche i risultati negativi infatti possono portare a grandi verit . Planck in tempi abbastanza recenti (1924) sosterr  che non vi   una dimostrazione teorica del principio di impossibilit  del moto perpetuo: esso si deve accettare sulla base dell'evidenza sperimentale, evidenza che va presa con cautela perch    legata a sperimentazioni in settori ristretti della fisica:

Bisogna considerare che si   lavorato per secoli riguardo alla fondazione di questa

proposizione; ci furono persone che non temevano di rischiare vita e beni per confutare le affermazioni di questa proposizione attraverso la creazione di valore-lavoro dal nulla. Se infatti si vuol ritenere valida una prova indiretta ottenuta sperimentalmente, bisogna operare in questo modo e non si troverà troppo alto il prezzo al quale fu conquistata per l'umanità una verità così di valore. In ogni modo il fatto è che al giorno d'oggi non si esita a dichiarare pazzo colui che non rinuncia alla costruzione di un *perpetuum mobile*.

Un po' più debole è comunque la prova della proposizione contraria, che il valore-lavoro non può sparire in nulla. Non si è trovato quasi mai qualcuno che si sia occupato praticamente del problema di distruggere lavoro come pure di trasformare oro in piombo. Non possiamo quindi parlare di prova sperimentale in senso pieno della impossibilità della soluzione di questo problema, come di quella della prima proposizione, ma ci dobbiamo limitare a constatare il fatto che non è stato ancora osservato un processo in cui non si è prodotto nient'altro se non la distruzione del valore-lavoro.

Ci dobbiamo accontentare di un fatto al posto di una prova; non si può perciò parlare di deduzione della proposizione contraria da quella diretta dato che non tutti i processi naturali si possono capovolgere. In senso logico non si troverebbe nessuna contraddizione nel supporre che il lavoro non può certamente venire dal nulla, ma in certe circostanze può sparire nel nulla. D'altronde bisogna ammettere che anche la prova sperimentale della proposizione diretta: l'impossibilità della produzione di lavoro dal nulla, è stata ottenuta in una parte relativamente molto limitata dell'intero campo delle forze naturali, attualmente ci sono noti e accessibili fenomeni molto più svariati di una volta, quando si aspirava alla conquista pratica del *perpetuum mobile*. Al momento presente non si può facilmente giudicare in che senso sia corretto estendere le esperienze, raggiunte precedentemente in un ambito più ristretto, a tutti gli effetti di natura, dato che poi, per familiarità col principio dell'energia, siamo troppo abituati alla validità generale di questa verità per poter provvisoriamente prescindere del tutto da esso. (*Il principio di conservazione dell'energia*)

Una autorevole affermazione dell'impossibilità di costruire un *perpetuum mobile*; si ebbe nel 1775 da parte della *Academie Royale des Sciences* di Parigi, ed anch'essa ovviamente non si basa su di una dimostrazione teorica ma assume semplicemente uno stato di fatto:

La risoluzione dell'Accademia reale delle Scienze di Parigi di non accettare comunicazioni concernenti il moto perpetuo fu approvata nel 1775 e suona come segue:

L'Accademia ha approvato quest'anno di non esaminare alcuna soluzione di problemi sui seguenti argomenti:

La duplicazione del cubo, la trisezione dell'angolo, la quadratura del cerchio o alcuna macchina per dimostrare il moto perpetuo.

Consideriamo doveroso da parte nostra spiegare i motivi che ci hanno condotto a questa determinazione.

La costruzione di una macchina del moto perpetuo è assolutamente impossibile. Anche ammesso che l'attrito e la resistenza del mezzo non distruggessero infine l'effetto della potenza motrice primaria, tale potenza non potrebbe produrre un effetto uguale alla sua causa; se, poi, si desidera che l'effetto di una potenza sia quello di agire continuamente, l'effetto dev'essere infinitamente piccolo in un tempo dato. Se si riuscissero a eliminare l'attrito e la resistenza, il primo moto impartito a un corpo continuerebbe sempre; esso non agirebbe però in relazione ad altri corpi e l'unico moto perpetuo possibile in quest'ipotesi (che non potrebbe esistere in natura) sarebbe assolutamente inutile e non potrebbe quindi realizzare l'obiettivo che i costruttori di queste macchine del moto perpetuo si propongono. L'inconveniente di queste ricerche è di essere enormemente dispendiose, tanto che esse hanno rovinato più di una famiglia; spesso la meccanica che avrebbe potuto rendere grandi servizi al pubblico, ne ha sperperato i mezzi, il tempo e la genialità.

Sono questi i motivi principali che hanno dettato la determinazione dell'Accademia. Affermando di non volersi più occupare di questi argomenti, i membri dell'accademia non fanno altro che dichiarare la loro opinione circa la completa inutilità delle fatiche profuse da coloro che se ne occupano. E' stato detto spesso che, nel tentativo di risolvere problemi chimerici, sono state trovate molte verità utili; è questa un'opinione che ha avuto origine in un'epoca in cui era ignoto il metodo appropriato per scoprire la verità, metodo che oggi è invece ben noto. E' più che probabile che il giusto modo per scoprire le verità sia quello di cercarle. Ma la quadratura del cerchio è l'unico,

fra i problemi ripudiati dall'Accademia, suscettibile di dare origine a qualche ricerca utile; e, se un geometra dovesse risolvere tale problema la determinazione dell'Accademia non farebbe che accrescerne il merito, in quanto dimostrerebbe l'opinione che i geometri hanno della difficoltà, per non dire insolubilità, del problema

DALL'IMPOSSIBILITA' DEL MOTORE PERPETUO SI RICAVANO LEGGI FISICHE

Ma già da alcuni secoli vari pensatori avevano abbracciato l'idea di questa impossibilità e ne avevano dedotto importanti conseguenze. I loro meriti nei confronti dello sviluppo del principio di conservazione dell'energia sono pertanto enormi: le fasi iniziali della formazione dei concetti scientifici sono spesso le più difficili e quindi ci troviamo di fronte a dei veri pionieri.

Tra questi pensatori troviamo Leonardo (1452-1519) che ebbe conoscenza del principio degli spostamenti virtuali ovvero del concetto di lavoro: " Se una potentia move un corpo per alquanto spazio in alquanto tempo, la medesima potentia moverà la metà di quel corpo, nel medesimo tempo, due volte nello spazio" (Ms F,f 51 v). Leonardo era anche convinto dell'impossibilità del "moto" perpetuo:

"Qualunque peso possa essere attaccato alla ruota, peso che sia la causa del movimento di questa ruota, senza alcun dubbio il centro di tale peso rimarrà al di sotto del centro dell'asse (della ruota).

E nessuno strumento che gira intorno al suo asse può essere costruito dall'ingegno umano che sia capace di evitare questo risultato.

O speculatori sul moto perpetuo, quante vane chimere avete creato in questa ricerca? Andate e prendete il vostro posto tra i cercatori d'oro" (Forster II, 92v).

Molto chiara appare la distinzione tra moto perpetuo e motore perpetuo in uno dei famosi professori della nostra Università: Gerolamo Cardano (1501-1576). Nel *De Subtilitate* infatti egli scrive: "Per l'esistenza del *perpetuum mobile* un corpo che ha raggiunto la fine del suo percorso (naturale) deve essere riportato dietro all'inizio. Ma non è possibile portarlo indietro senza l'utilizzazione di qualche altra cosa. Pertanto la continuità del moto segue solo da ciò che è in accordo alla natura, o essa non è uniforme. Ciò che diminuisce sempre a meno che non sia rinnovato continuamente non può essere perpetuo".

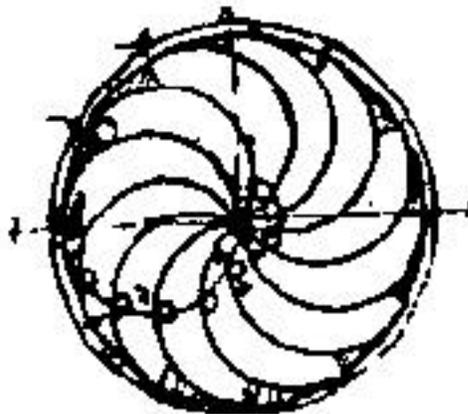


Fig. 2 Tentativo di motore perpetuo

Ma il primo che utilizzerà il principio dell'impossibilità del moto perpetuo per raggiungere dei risultati in fisica sarà Stevino (1548-1620) che per questa via risolverà il problema del piano inclinato. Il problema è il seguente: abbiamo un piano inclinato privo di attrito di sezione triangolare, i cui lati misurano 3, 4 e 5. Appendiamo alla puleggia un peso Q posto sul piano inclinato. Con quale peso W dobbiamo equilibrarlo all'altra estremità della puleggia?

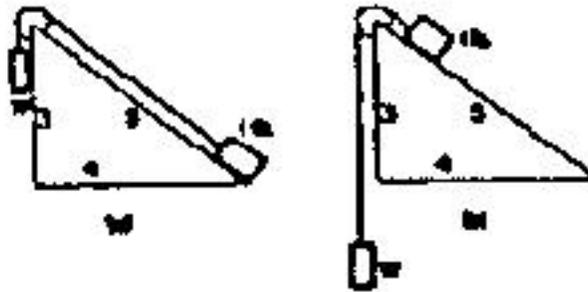


Fig. 3 Piano inclinato

La soluzione fu di tale importanza che Stevino la raffigurò sul frontespizio della sua opera *Hypomnemata Mathematica* (Leida 1608) sotto la scritta: *La meraviglia non è più meraviglia*. Lo stesso disegno fu poi posto sulla tomba di Stevino, a guisa di epitaffio.

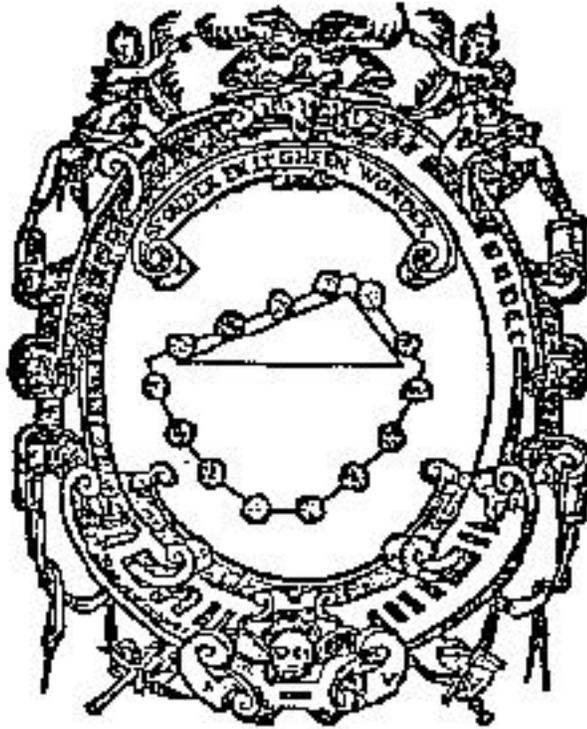
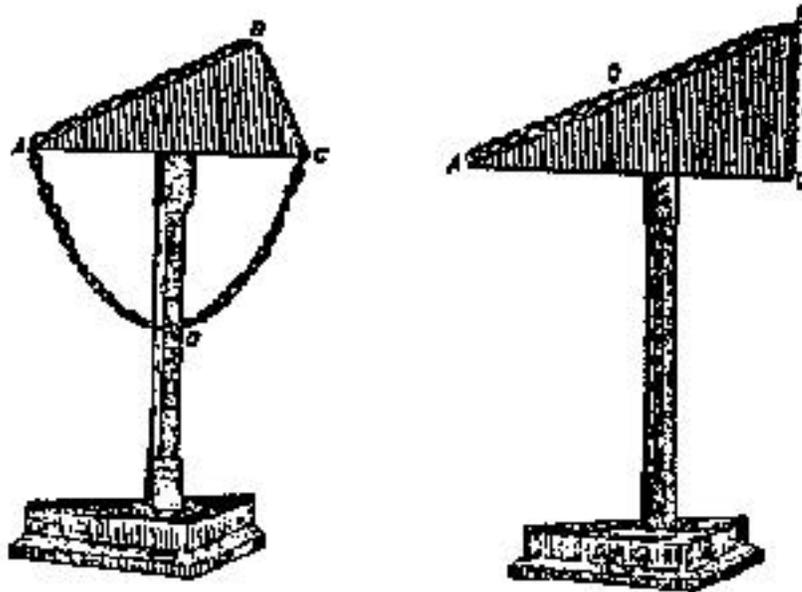


Fig. 4 La meraviglia non é più meraviglia

Esaminiamone brevemente il significato seguendo E.Mach:

Stevino procede nel modo seguente. Considera un prisma di base triangolare, i cui spigoli laterali sono disposti in posizione orizzontale, e la cui sezione trasversale ABC è presentata nella figura 5 . Sia, per esempio, $AB=2BC$, e AC sia orizzontale. Stevino appoggia su questo prisma un filo chiuso portante quattordici palle equidistanti del medesimo peso.

Possiamo sostituirlo con una fune o una catena omogenea chiusa. La catena o starà in equilibrio o non vi starà. Supponiamo che si verifichi il secondo caso. Allora la catena, poiché la configurazione del sistema non muta durante il suo movimento, una volta che sia in moto continuerà indefinitamente a muoversi, cioè realizzerà un *perpetuum mobile*: cosa che a Stevino appare assurda. Il solo caso possibile è quindi il primo: la catena resta in equilibrio. Possiamo ora togliere la parte ADC della catena che è simmetrica, senza rompere l'equilibrio: la parte AB della catena fa equilibrio alla parte BC. Ne risulta che sui piani inclinati di uguale altezza pesi uguali agiscono in ragione inversa delle lunghezze dei piani. Supponiamo ora che nella sezione di prisma della figura 6 AC sia orizzontale, BC verticale e $AB=2BC$. Siano Q e P i pesi delle parti AB e BC della catena, pesi proporzionali alle lunghezze: si avrà di conseguenza $Q/P=AB/BC=2$. La generalizzazione è evidente.



Figg. 5 e 6 11 piano inclinato di Stevino

La soluzione del problema del piano inclinato ebbe una notevole importanza nell'elaborazione della legge della caduta dei gravi da parte di Galileo.

L'opera di Galileo ci dà la possibilità di riconsiderare la distinzione tra moto perpetuo e motore perpetuo: il significato della legge d'inerzia è che un corpo non si può mettere in moto da solo e che, una volta in moto non può distruggere il proprio moto. Una resistenza deve essergli opposta, tramite la quale il moto del corpo viene assorbito da altri corpi. Pertanto la possibilità di un corpo di restare indefinitamente in moto è legata alla impossibilità di compiere lavoro durante il moto, cioè all'impossibilità di una continua produzione di lavoro. La legge d'inerzia è dunque strettamente collegata all'impossibilità del motore perpetuo e Galileo ne era ben consapevole: tale impossibilità infatti sarà alla base della scoperta della legge di caduta dei gravi.

Anche le leggi del piano inclinato (Stevino), hanno un ruolo nella sperimentazione che conduce Galileo a formulare la legge di caduta dei gravi. Galileo misura i tempi di caduta con un orologio ad acqua e scopre che le distanze percorse sono proporzionali al quadrato dei tempi impiegati a percorrerle:

$$s = 1/2 g t^2$$

Le velocità finali sono proporzionali al tempo:

$$v_f = g t$$

Ma l'idea di Galileo che sarà fondamentale per lo sviluppo del principio di

conservazione dell'energia è la seguente: le velocità finali di caduta sono indipendenti dalla traiettoria percorsa (cioè dall'inclinazione del piano) e dipendono solo dall'altezza di caduta. Sulla base di questa idea Galileo determina che al variare dell'inclinazione del piano variano sia la costante di proporzionalità g sia il tempo t , ma il loro prodotto resta costante:

$$g't' = gt.$$

L'impossibilità del *perpetuum mobile* è di nuovo al centro dell'argomentazione. Galileo suppone che un corpo acquisti la stessa velocità finale sia cadendo secondo l'altezza del piano inclinato, sia cadendo secondo la lunghezza dello stesso piano. Immaginiamo infatti di deviare la velocità finale verso l'alto: il movimento sarà speculare e la velocità diminuirà proporzionalmente al tempo, annullandosi all'altezza originaria di caduta.

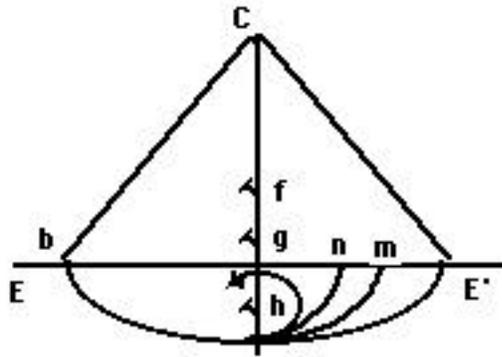


Fig.7 Pendolo con vincoli di Galileo

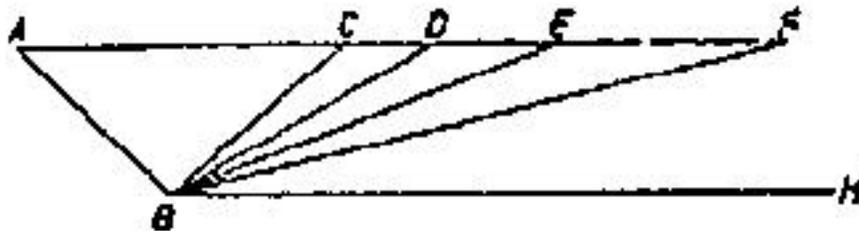


Fig. 8 Successioni di piani inclinati

Il corpo infatti risale alla stessa altezza da cui è caduto: se l'altezza fosse superiore sarebbe violata l'impossibilità del *perpetuum mobile*; il corpo, con operazioni successive, in virtù del solo proprio peso potrebbe essere sollevato indefinitamente. Questa considerazione teorica porta a fissare l'attenzione sull'altezza di caduta e non sulla traiettoria percorsa. Galileo formula anche una indicazione sperimentale.

Spostato il pendolo dalla sua posizione di equilibrio e lasciandolo cadere, esso risale alla stessa altezza dall'altra parte. Il movimento della sfera del pendolo lungo il suo arco di cerchio può essere considerato come una caduta su una serie di piani con differente inclinazione. Si può facilmente, dice Galileo, far risalire il corpo su un diverso arco di cerchio, cioè su una

diversa serie di piani inclinati. Ciò viene realizzato mediante i chiodi f, g, h. Si può controllare che l'altezza di risalita è sempre la stessa, indipendentemente dalla traiettoria. Nel caso in cui la lunghezza del filo non consenta di raggiungere la posizione di risalita (vincolo h) il corpo tende a riavvolgersi sul vincolo, indice che la velocità non si è annullata.

Questo fondamentale risultato porta alla nota legge:

$$v_f = \sqrt{2gh}$$

Da questa base partirà Huygens per risolvere un nuovo problema: la determinazione del centro d'oscillazione di un pendolo composto. Anche qui viene applicato il principio d'impossibilità del motore perpetuo.

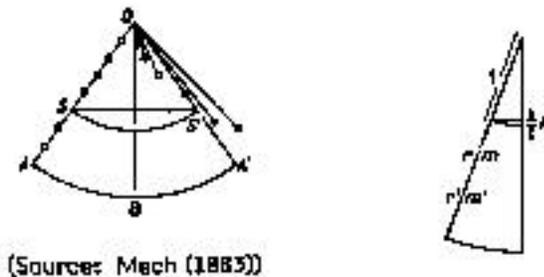
Huygens assunse che le velocità acquistate nel moto di discesa del pendolo possono essere soltanto tali che il centro di gravità delle masse possa risalire esattamente alla stessa altezza da cui è disceso; questo vale sia che le masse restino vincolate tra loro, sia che i vincoli siano tolti.

Nelle parole di Huygens: "Noi supponiamo che quando un numero qualunque di pesi cominciano a muoversi per effetto della loro propria gravità, il centro comune di gravità non può alzarsi ad una altezza superiore a quella in cui si trovava all'inizio del movimento" (*Horologium Oscillatorium*, 1673).

Questa ipotesi, dice Huygens, significa solo ciò che nessuno ha mai negato: cioè che i corpi pesanti non salgono da soli; il legame con l'impossibilità del *perpetuum mobile*, come nel caso di Galileo, è evidente; Huygens conclude: "Se gli inventori di nuove macchine che si sforzano invano di ottenere il movimento perpetuo, sapessero fare uso di queste ipotesi, scoprirebbero facilmente da loro stessi i propri errori e comprenderebbero che questo movimento non può in alcun modo essere ottenuto con dei mezzi meccanici".

Ma esaminiamo un po' più in dettaglio le conclusioni tratte dal principio di Huygens. In *figura 9* è mostrato un pendolo composto nella posizione *OA*. Il centro di gravità è in *S*.

Immaginiamo che il pendolo compia un'oscillazione: esso risalirà in *S'*. Supponiamo ora che le masse componenti il pendolo possano oscillare individualmente a partire dalla retta *OA*. Ogni massa risalirà, sebbene in tempi diversi, nella posizione corrispondente lungo *OA'* e di nuovo il centro di gravità sarà in *S'*. Ma cosa accadrà se il pendolo composto perde i



(Source: Mech (1883))

Fig.9 Pendolo composto di Huygens

vincoli nella posizione verticale *OB*? Le velocità acquisite dalle singole parti nella caduta non saranno più calcolabili tramite la legge di Galileo, questa infatti riguarda la caduta libera e non quella vincolata. Le masse più vicine all'asse saranno state ritardate dai vincoli e

quelle più lontane accelerate. Tramite un dispositivo sperimentale si può determinare la velocità finale di caduta delle singole masse: basterà eliminare i vincoli nella posizione verticale ed osservare le altezze (libere) di risalita. Le masse più vicine all'asse saranno risalite ad un'altezza inferiore a quella corrispondente ad una caduta libera, mentre quelle più lontane ad un'altezza superiore.

Il principio di Huygens asserisce che anche in questo caso il centro di gravità sarà nella posizione S'. Per le proprietà del centro di gravità il percorso seguito da questo centro in qualsiasi direzione è espresso dalla somma dei prodotti delle masse di ogni particella per la distanza percorsa nella stessa direzione divisa per la somma delle masse:

$$K = \mathbf{S}m\mathbf{r}/\mathbf{S}m$$

Noi possiamo uguagliare questo valore a due differenti espressioni: nel caso della caduta e risalita libera per la legge di Galileo le kr possono essere sostituite da:

$$r = v^2/2g \qquad (v = \sqrt{2gh})$$

quindi si ha:

$$K(\mathbf{S}m\mathbf{r}/\mathbf{S}m) = 1/2 g(\mathbf{S}m\mathbf{v}^2/\mathbf{S}m) \qquad (1)$$

Nel caso della caduta vincolata e risalita libere le kr sono determinate sperimentalmente nella risalita libera e quindi (applicando questa volta la legge di Galileo) si ricavano le velocità di caduta vincolata (u):

$$K(\mathbf{S}m\mathbf{r}/\mathbf{S}m) = 1/2 g(\mathbf{S}m\mathbf{u}^2/\mathbf{S}m) \qquad (2)$$

Ora per il principio di Huygens (1) e (2) sono uguali, cioè il centro di gravità risale alla stessa altezza in ogni caso.

Si ottiene pertanto:

$$\mathbf{S}m\mathbf{v}^2 = \mathbf{S}m\mathbf{u}^2$$

che è la prima e fondamentale espressione del teorema di conservazione della forza viva mv^2 .

Tale teorema dice che la quantità $\mathbf{S}m\mathbf{v}^2$ è una caratteristica della posizione del sistema dei corpi e non delle traiettorie percorse per arrivare in quella posizione. Pertanto tale quantità si conserva in una data posizione indipendentemente dalle traiettorie (cioè dai vincoli). Viene così stabilita una prima idea di conservazione.

Cap. 2 Il principio di conservazione dell'energia

IL DIBATTITO SULLA " VIS VIVA" TRA CARTESIANI E LEIBNIZIANI

L'idea di conservazione di Huygens non fu l'unica. Prima di considerarne gli sviluppi ci soffermeremo su altri due importanti contributi: quello di Cartesio e quello di Leibniz. Cartesio nei suoi *Principia Philosophiae* (1644) dice:

Dopo aver esaminato la natura del movimento bisogna che ne consideriamo la causa, e poiché essa può essere presa in due maniere, cominceremo dalla prima e più universale, che produce generalmente tutti i movimenti che sono al mondo; considereremo in appresso l'altra la quale fa sì che ogni parte della materia acquisti movimenti che non aveva prima. Per quanto riguarda la prima mi sembra evidente che non ce n'è altra che Dio, che per sua onnipotenza ha creato la materia con il movimento e il riposo, e che conserva adesso nell'universo, col suo concorso ordinario, tanto movimento o riposo quanto ce n'ha messo creandolo. Poiché sebbene il movimento non sia che un modo nella materia che è mossa, essa ne ha pertanto una certa quantità che non aumenta e non diminuisce mai, benché ce ne sia ora più e ora meno in alcune delle sue parti. Ecco perché quando una parte della materia si muove due volte più presto di un'altra, e questa è due volte maggiore della prima noi dobbiamo pensare che c'è tanto movimento nella più piccola che nella maggiore, e che tutte quante le volte il movimento di una parte diminuisce, quello di qualche altra parte aumenta in proporzione. Noi conosciamo anche che è una perfezione in Dio non solamente di essere immutabile nella sua natura, ma anche di agire in un modo che non cambia mai, tanto che, oltre i cambiamenti che vediamo nel mondo e quelli cui crediamo perché Dio li ha rivelati, e che sappiamo accadere o essere accaduti nella natura senza alcun cambiamento da parte del Creatore, non ne dobbiamo supporre altri nelle sue opere per paura di attribuirgli incostanza. Da cui segue che poiché egli ha mosso in molte maniere differenti le parti della materia, quando le ha create, e le mantiene tutte nella stessa maniera e con le stesse leggi ch'egli ha potuto osservare loro nella creazione, conserva incessantemente in questa materia un'uguale *quantità di movimento*.

Da questo brano, in cui viene espressa la legge:

$$S m_i v_i = cost$$

valida per un sistema isolato emergono alcuni aspetti di rilievo della concezione meccanicistica della natura.

Secondo Cartesio tutti gli esseri materiali sono macchine regolate dalle stesse leggi meccaniche, il corpo umano come gli animali, le piante e la natura. Ciò era direttamente in contrasto con la concezione aristotelica della gerarchia della catena degli esseri. Per Cartesio il mondo fisico e organico costituiva un sistema meccanico omogeneo composto di entità qualitativamente simili, ciascuna delle quali obbediva alle leggi meccaniche quantitative rivelate dall'analisi fatta secondo il metodo matematico. Cartesio avanzò anche l'ipotesi che oltre al mondo meccanico esistesse anche un mondo spirituale al quale l'uomo, unico tra gli esseri materiali, poteva partecipare. Quindi l'universo si componeva di due piani orizzontali, uno meccanico e uno spirituale: da allora in poi tale dualismo ha svolto un ruolo fondamentale nello sviluppo del pensiero europeo. Cartesio inoltre fu il primo a ipotizzare che la natura fosse governata nella sua totalità da leggi e identificò le leggi della natura coi principi della meccanica. Le regole quantitative scoperte dagli antichi Greci, infatti venivano chiamate "principi" e così anche Galileo le chiamava "principi", "rapporti", "proporzioni".

Tra Galileo e Newton c'è il passaggio: il "principio di inerzia" diventa la "prima legge del movimento" - Cartesio quindi supponeva che Dio governasse l'Universo interamente in virtù di "leggi di natura" che erano state stabilite all'inizio del mondo. Una volta creato

l'universo la divinità non aveva più interferito minimamente nella macchina creata che continuò a funzionare da se stessa. La quantità di materia e la quantità di movimento presenti nell'universo erano costanti ed eterne come leggi di Dio; ciò era in palese contrasto con la concezione medievale dell'intervento costante di Dio attraverso le gerarchie angeliche: in definitiva si affermava così la concezione del mondo come orologio perfetto.

Infine va notato che Cartesio riteneva possibile dedurre tutti i tratti salienti del mondo naturale argomentando in maniera quasi matematica a partire da principi certi e indubitabili. Per quanto riguardava gli esperimenti la loro importanza era relativa: erano considerati più come illustrazione che come la base empirica per risalire induttivamente a leggi generali.

La filosofia di Cartesio incontrò l'ostilità dei teologi cattolici del XVII secolo; giacché essa rivaleggiava col sistema di Aristotele. Cartesio forniva alternative costruttive sia al metodo che alla cosmologia di Aristotele, anche se egli forse ebbe meno successo del suo illustre predecessore: non riuscì a unificare in un sistema unitario tutte le più significative correnti intellettuali che si erano affermate nella filosofia della natura di quel tempo. Bacon aveva proposto un altro concetto di metodo scientifico, mentre Galileo e Keplero, nei loro campi, avevano dato del metodo matematico una formulazione più adeguata alla scienza. Newton inoltre doveva fornire il sistema del mondo più definitivo e duraturo del XVII secolo, utilizzando il metodo galileiano più che quello cartesiano. Cartesio comunque rimane uno dei grandi cardini di quella concezione meccanicistica della natura che ha influenzato profondamente la cultura occidentale del '700 e dell'800 e ancora in una certa misura influenza la cultura odierna

Ritornando più specificatamente alla legge della conservazione della quantità di moto proposta da Cartesio bisogna notare che sebbene a prima vista essa sembrava dare una descrizione corretta delle collisioni in realtà presentava due difetti: 1) la legge, anche se fosse esatta, non riuscirebbe a determinare il risultato di una collisione (Cartesio era consapevole di questo fatto e propose delle regole aggiuntive, però inesatte); 2) la velocità v della formula è una quantità scalare mentre gli esperimenti indicavano che i risultati di una collisione dipendevano anche dalle direzioni del moto degli oggetti in collisione. Pertanto per gli scienziati che accettavano la concezione meccanicistica cartesiana, con l'importanza attribuita ai moti e agli urti di piccole parti di materia (Cartesio sosteneva una teoria dei vortici in uno spazio pieno di materia), era necessaria una formulazione corretta. Nel 1662 fu organizzata la Royal Society e per gli sforzi congiunti di alcuni suoi fondatori (Hooke, Wren, Wallis) e di Huygens si arrivò nel 1669 al risultato corretto: il "momento" totale di un sistema si conservava:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Sfortunatamente però per la concezione dell'orologio perfetto la nuova legge di conservazione del momento non garantisce il moto perpetuo dell'universo a meno che tutte le collisioni non siano perfettamente elastiche. Sembrava quindi che la conservazione del momento (vettore) avesse dimostrato la non conservazione della quantità di moto (scalare) di Cartesio e quindi del moto dell'universo nel suo complesso (considerando valida la conservazione della materia). Di lì a poco però si sarebbe scoperta la conservazione delle "forze vive" (scalare) e quindi si sarebbe riaperto il discorso. La conservazione delle "forze vive" poneva rimedio, almeno per le collisioni elastiche, al primo difetto della legge cartesiana su menzionato: forniva lo strumento per determinare il risultato di una collisione, note le masse e le velocità iniziali.

In un famoso articolo del 1686 Leibniz si contrappone alla concezione cartesiana e dà vita ad una lunga polemica, che è ancora oggetto di approfondite analisi storiche. Il titolo del lavoro di Leibniz è molto esplicito: *Breve dimostrazione di un errore memorabile di Descartes e di altri concernente la legge naturale secondo la quale essi affermano che la stessa quantità di moto è sempre conservata da Dio, una legge che essi usano in maniera erronea nei problemi meccanici.*

Qual'è la posizione di Leibniz? Leibniz accetta, come Cartesio, che esista in natura un principio generale di conservazione (pur non basando questa convinzione sul riferimento a Dio). Ma cos'è che si conserva? Si conserva nel mondo la totale "potenza motrice". Infatti nessuna forza motrice può essere persa da un corpo senza essere trasferita in un altro, nè può essere aumentata "perché non esiste il *perpetuum mobile* " e nessuna macchina neanche il mondo inteso come un tutto è capace di mantenere la sua forza senza un impulso addizionale esterno.

Abbiamo qui dunque delineati due elementi: un principio di conservazione ed una indicazione della quantità conservata: la somma della forza motrice di un sistema isolato. All'interno del sistema tale forza motrice può essere trasferita da una parte all'altra. Ma come si misura questa forza motrice? Non, dice Leibniz, con la quantità di moto mv .

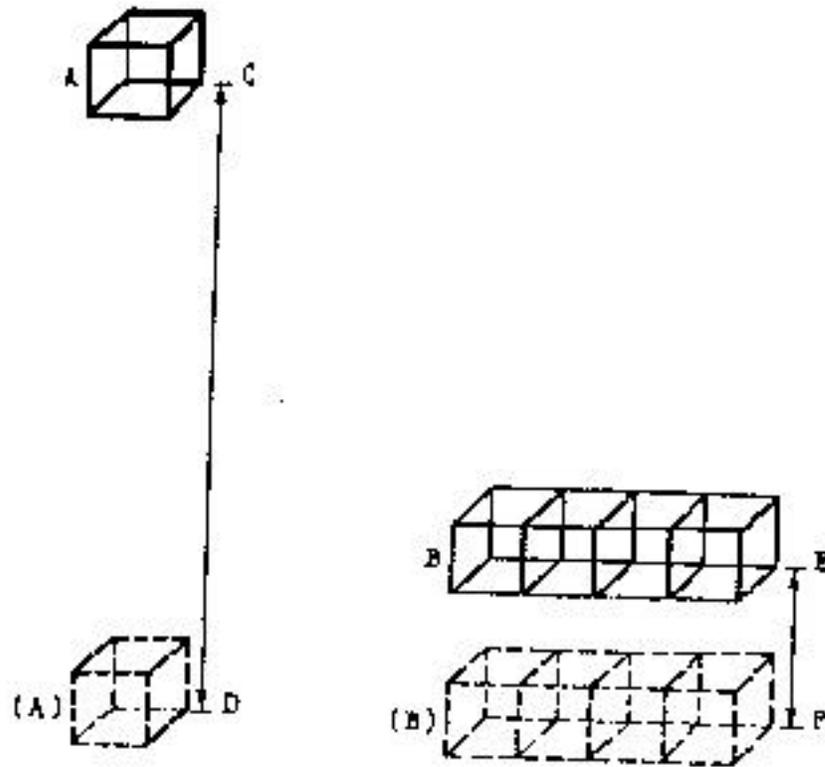


Fig.10 Esempio di Leibniz

L'argomentazione di Leibniz è la seguente: Egli considera due corpi di differente peso: m e $4m$, e assume che il primo sia portato dalla posizione di riferimento all'altezza $4h$ ed il

secondo all'altezza h . Leibniz assume esplicitamente che "un corpo che cade da una certa altezza acquista una forza motrice tale da permettergli di risalire alla stessa altezza" (trascurando gli attriti). A questo proposito cita esplicitamente gli esperimenti con i pendoli.

Egli assume anche che lo stesso lavoro è necessario per sollevare il peso $4m$ all'altezza h di quello necessario a sollevare il peso m all'altezza $4h$. Da queste due assunzioni segue che quando i due corpi, cadendo dalle rispettive altezze, raggiungono la posizione di riferimento essi posseggono la stessa *vis motrix* (capacità di compiere lavoro). Infatti:

$$(4m) hg = m (4h)g$$

Ma qual'è la misura corretta di questa capacità di compiere lavoro? Dalla relazione di Galileo:

$$v_h = \sqrt{2gh}$$

si ha: $4mv_h^2 = mv_{4h}^2$

poiché: $v_{4h} = 2v_h$

cioè il corpo che cade da $4h$ avrà una velocità finale doppia del corpo che cade da h . Pertanto la quantità di moto cartesiana mv non può essere la misura esatta della capacità di compiere lavoro. Quest'ultima deve essere misurata da mv^2 (*vis viva*). Infatti:

$$4m (v_h)^2 = m(v_{4h})^2$$

I due sistemi, avendo uguali capacità di compiere lavoro (uguale forza motrice) hanno la stessa forza viva mv^2 .

Pertanto la forza motrice va misurata con la mv^2 e ciò che si conserva in un sistema isolato è la $\mathbf{S}mv^2$.

Occorre precisare, per capire la successiva storia del principio di conservazione dell'energia, le differenze tra Cartesio e Leibniz da una parte e Leibniz e Huygens dall'altra. Cosa intendevano Cartesio e Leibniz per "forza"? Secondo una linea interpretativa che risale a D'Alembert (*Traité de Dynamique, 1743*) il problema era di carattere formale.

D'Alembert pose infatti in evidenza che i due punti di vista dipendevano da una confusione terminologica e che, a suo parere, la controversia poteva essere risolta con opportune definizioni. Infatti il concetto cartesiano di forza implica che si misuri l'efficacia di una forza dai suoi effetti nel tempo ovvero con l'integrale in dt della forza; ma questo è proprio il cambiamento del momento della particella su cui agisce la forza; nel caso di una particella di massa m dalla 2^a legge di Newton:

$$F = d(mv)/dt$$

si ricava:

$$\int_{t_0}^{t_1} F dt = (mv)_1 - (mv)_0$$

dove il secondo membro è la differenza tra i valori del momento agli istanti t_0 e t_1 , tra i quali si assume che la forza agisca.

D'altra parte è perfettamente possibile misurare l'efficacia della forza dai suoi effetti nello spazio, e ciò era in definitiva quello che aveva in mente Leibniz. Con notazione odierna (nel caso particolare del moto di una particella lungo l'asse x):

$$\int_{x_0}^{x_1} F dx = [(1/2 mv^2)_1] - [(1/2 mv^2)_0]$$

ovvero l'effetto cumulativo della forza sulla distanza (il primo membro, ciò che oggi viene definito lavoro fatto dalla forza) è uguale al cambiamento della quantità $1/2mv^2$ tra le due posizioni x_1 e x_0 , effettuato per l'azione della forza.

Abbiamo detto che D'Alembert aveva risolto formalmente la controversia: in effetti le discussioni nell'ambiente dei dotti dell'epoca continuarono ancora a lungo e questo è un ulteriore chiaro indice che si scontravano non solo due modi diversi di misurare la forza (su questo punto le chiarificazioni di D'Alembert si possono considerare definitive) ma due concezioni completamente diverse della forza e in definitiva due concezioni completamente diverse della visione meccanicistica della natura.

In particolare col riconoscimento della legge d'inerzia e con l'accettazione del principio di conservazione del movimento si presentavano due possibilità di tipo alternativo: o concepire la forza come causa della variazione del moto o abolire del tutto la nozione di forza. In ogni caso la velocità in quanto tale non poteva più essere considerata come l'indicazione dell'esistenza di una forza o come indicazione della misura di quest'ultima. Cartesio si opponeva all'esistenza di forze attrattive di tipo newtoniano: la sua assoluta dicotomia tra pura materia e puro spirito era incompatibile con l'assunzione di forze esercitate dalla materia stessa in quanto le forze ai suoi occhi erano ancora nozioni di tipo pressoché psichico. Le uniche caratteristiche della materia erano l'estensione e l'eterno movimento. Rifiutando quindi l'azione a distanza Cartesio elaborò la teoria dei vortici per rendere ragione dei lontani moti celesti. Il programma cartesiano era in realtà quello di geometrizzare la fisica, programma troppo arduo forse per essere realizzato ancor prima che nascesse la meccanica classica, ma che avrà in seguito indubbe connessioni con il programma einsteiniano. Cartesio era per l'abolizione della forza a distanza ma nell'azione per contatto (in particolare l'urto delle particelle d'etere che riempivano tutto lo spazio e costituivano i vortici) legava il concetto di forza alla quantità di moto.

E' proprio contro questo concetto di forza motrice misurato dalla quantità di moto che si scaglia Leibniz nel suo famoso articolo su citato.

Cos'era infatti per Leibniz la forza? A rigor di termini il concetto di forza di Leibniz coincide con quella che oggi viene definita l'energia cinetica, con la differenza però che egli la considerava come un principio vitalistico, inerente alla materia e identico alla natura più intima della materia stessa: "Per dare un saggio delle mie concezioni mi è sufficiente spiegare che la nozione di forza o virtù, che i Tedeschi chiamano *Kraft* e i Francesi *force*, e per esporre la quale io ho elaborato una scienza particolare della dinamica, chiarisce di molto la comprensione del concetto di sostanza. In effetti la forza differisce dal concetto di mera potenza così familiare alla Scolastica in quanto questa potenzialità o facoltà non è altro che una possibilità pronta ad agire, la quale necessita, però, di un'eccitazione o di uno stimolo

esterni per poter passare all'atto. Ma la forza attiva contiene un certo atto o entelechia e si trova a mezza strada tra la facoltà dell'agire e l'azione stessa; essa implica lo sforzo, e così passa di per se stessa all'operazione; nè ha bisogno di alcun ausilio ma semplicemente della rimozione dell'impedimento."

Jammer nota l'interesse di queste osservazioni per la storia della fisica " non solo perché affermano uno status ontologico indipendente per il concetto di forza leibniziano, ma anche perché sostengono a gran voce una nuova scienza particolare - indicata forse per la prima volta con il nome di dinamica - intesa come studio e ricerca delle sue manifestazioni entro la natura.

"Leibniz non era solo un teologo e metafisico, ma anche un fisico e matematico. Non c'è pertanto, da stupirsi che egli stesse cercando una determinazione qualitativa e quantitativa del proprio concetto di forza nell'ambito dello schema concettuale della fisica". La determinazione qualitativa si riferisce al principio d'inerzia: per Leibniz l'inerzia è una *vis insita* reale in senso dinamico; lo stato di variazione continua di luogo implica un certo sforzo, questo deve essere il risultato di una forza o attività interna al corpo in moto non potendo per il principio d'inerzia essere esterna.

La determinazione quantitativa del concetto di forza è stata su esposta e in relazione a quanto detto prima sull'intuizione in Leibniz di un principio di conservazione va notato che Leibniz concepiva gli atomi come elastici (in accordo alla sua monadologia) e questa assunzione gli rese possibile di sostenere con coerenza la conservazione della "forza" nell'universo. In effetti Huygens aveva dimostrato la conservazione di mv^2 per urti elastici: per Leibniz la perdita di "forza" in urti anelastici è solo apparente: si "obietta che quando due corpi soffici o non elastici si incontrano, perdono un po' della loro forza...E' vero, essi ne perdono un po' rispetto al loro moto totale; ma questa frazione è ricevuta dalle loro parti, scosse dalla forza dell'urto. Questa perdita è pertanto solo apparente. Le forze non sono distrutte, ma disperse tra le parti piccole. I corpi non perdono le loro forze; ma questo caso è lo stesso che si ha quando gli uomini cambiano denaro in moneta spicciola".

E' fin troppo facile dal punto di vista odierno leggere in questo brano un'anticipazione della trasformazione dell'energia in un urto anelastico da cinetica a molecolare. Da parte di Leibniz questa è anche una polemica contro i newtoniani che ritenevano che la "forza" diminuisse costantemente negli urti anelastici e che quindi Dio avrebbe dovuto rifornire di volta in volta l'universo di nuove "forze" per evitare l'immobilità. Leibniz, come Cartesio, si oppone a questo intervento ricorrente perché è incompatibile col potere e la provvidenza divina: "Egli (Dio) non ha, così sembra, una provvidenza sufficiente a farne un moto perpetuo. Anzi, la macchina dell'azione di Dio è così imperfetta, secondo questi gentiluomini, che egli è obbligato a ripulirla, di volta in volta, ricorrendo a interventi straordinari, e persino a ripararla, come un orologiaio ripara il proprio lavoro; e si tratta di un operaio tanto meno abile quanto più spesso è obbligato a riparare il proprio lavoro e rimetterlo in condizione di ben funzionare. Secondo la mia opinione, la stessa forza e lo stesso vigore restano sempre nel mondo, e si limitano a passare da una parte della materia all'altra, conformemente alle leggi della natura".

E' di estremo interesse notare come queste convinzioni religiose (si confronti col brano di Cartesio) abbiano influito sulla genesi e sullo sviluppo della meccanica: in Cartesio e Leibniz c'è un'idea di conservazione anche perché viene rifiutato l'intervento ricorrente di Dio sull'universo, in Newton questa idea manca ed è presente (nei newtoniani) l'intervento divino.

Pertanto il dibattito tra cartesiani e leibniziani non era meramente un problema di parole. Come nota Planck entrambe le posizioni avevano una stessa radice: il tentativo di definire ciò da cui proviene ogni moto. Entrambi credevano in un principio di conservazione

ma scelsero di misurare la quantità conservata tramite valori equivalenti differenti. Indubbiamente, da questo punto di vista, la scelta di Leibniz era più pertinente. Nonostante la validità del principio (vettoriale) della conservazione della quantità di moto, il legame tra la forza viva ed il lavoro (l'effetto della forza in relazione allo spazio) stabilito da Leibniz doveva mostrarsi di straordinaria fertilità.

FISICA DELLA CONSERVAZIONE E FISICA DELLE TRAIETTORIE

Occorre esaminare ora la differenza tra l'idea di conservazione di Huygens e quella di Leibniz. In Huygens si parla di conservazione in una data posizione indipendentemente dalla traiettoria seguita per raggiungere quella posizione. In Leibniz si parla di conservazione durante un processo e non si fa riferimento a cammini liberi o vincolati. Nell'articolo citato Leibniz pone l'accento su due aspetti: da una parte asserisce che la capacità di compiere lavoro va misurata con la quantità mv^2 ; dall'altra asserisce (un po' oscuramente) che tra fenomeni statici e dinamici vi è una relazione di causa ed effetto espressa in unità di lavoro e che la conservazione è data dall'essere la causa equivalente all'effetto. La mv^2 esprime la capacità di compiere lavoro di un corpo in movimento e mgh esprime la capacità di compiere lavoro di un corpo in quiete sottoposto all'azione della gravità. La conservazione è legata al fatto che un corpo che cade può risalire alla stessa altezza da cui è caduto, cioè la causa (infinite applicazioni della forza morta o gravitazione per spostamento verticale) è uguale all'effetto (velocità acquisita al quadrato per la massa). Il processo si può invertire e la causa sarà allora il moto e l'effetto la posizione raggiunta.

La relazione di Galileo stabilisce l'equivalenza delle due misure quando $v=v_h$, ove v_h è la velocità che un corpo acquista quando cade dall'altezza h . In altri termini, i risultati di

Huygens sono, intesi in modo generale, come espressione del principio che l'effetto sarà uguale alla sua causa. Mv_h^2 dipende ancora dalle posizioni iniziali e finali, ma il significato di conservazione è cambiato: in Huygens era ancora un'invarianza rispetto a cammini differenti, in Leibniz è l'invarianza di una relazione causale dove le "forze esterne" sono le cause ed il moto l'effetto, $mgh = 1/2 mv_h^2$ esprime l'equivalenza di causa-effetto cioè la conservazione della quantità di *vis motrix* scambiata nel passaggio da una situazione statica ad una dinamica. Viene pertanto stabilito un principio generale: "La conservazione delle forze dei corpi che sono in moto consiste nell'uguaglianza tra effetto e causa efficiente."

Ma la mancanza di una chiara distinzione tra la definizione di forza e quella di energia e soprattutto la mancanza di un chiaro modello concettuale ed analitico per le forze impedì lo sviluppo e l'applicazione del principio. Cioè il principio non permise il calcolo della variazione di *vis mortua* (la capacità di effettuare lavoro di un sistema a riposo), ed il suo confronto con la variazione di forza viva (la capacità di effettuare lavoro di un sistema in moto). Ma il principio di conservazione della relazione causale tra i due fu chiaramente espresso.

Questo è il significato leibniziano di conservazione della forza viva. Da un punto di vista moderno è possibile vedere *in nuce* in questa formulazione l'intero principio di conservazione dell'energia meccanica, comprendente sia la *vis mortua* che la *vis viva* (in termini moderni la variazione di energia potenziale uguaglia la variazione di energia cinetica). Ma come si è già notato ciò non era presente in Leibniz per la mancanza di una distinzione tra

forza ed energia e per la mancanza di un modello preciso della forza.

Da questo punto di vista appare chiaro che Leibniz non stabilisce solo una misura della "forza" ma anche una particolare idea di conservazione, un principio che collega quantità interne (velocità) ed esterne (forze e posizioni) al sistema in moto.

$$\int_0^1 F \cdot ds = (mv^2)_1 - (mv^2)_0$$

esprime un principio: i due membri sono alternativamente la causa e l'effetto di un processo e ciò che si conserva nello scambio è la quantità dei due.

Per D'Alembert l'integrale è un teorema, il cosiddetto teorema del lavoro - forza viva (impropriamente chiamato oggi lavoro-energia cinetica) ed esprime soltanto un risultato analitico. E' chiaro che Leibniz aveva perfettamente intuito il principio di conservazione dell'energia senza averlo saputo formalizzare. Per più di 100 anni si sviluppò l'approccio di D'Alembert, che tendeva ad eliminare dalla fisica tendenze troppo filosofiche. Ma come si collegava in questa tradizione la variazione di forza viva alla conservazione della forza viva?

D. Bernoulli contribuì in questa direzione partendo dai risultati di Huygens su menzionati: $\sum mv^2 = \sum mu^2$ ove u sono le velocità libere e v quelle vincolate. Come può il teorema della forza viva essere utilizzato in connessione alle forze esterne?

Attraverso la relazione di Galileo, nel caso di accelerazione di gravità unitaria, e di distanze di caduta verticali uguali a x, x'.....

$$u^2 = 2x; u'^2 = 2x'; \dots$$

cioè il quadrato della velocità ottenuta è proporzionale allo spostamento e dato che questo è indipendente dall'effettivo cammino percorso dal corpo "si ha sempre conservazione della forza viva rispetto all'altezza dalla quale la caduta ha luogo", cioè:

$$mv^2 + m'v'^2 + \dots = 2mx + 2m'x' + \dots$$

e pertanto "la forza viva totale è uguale al prodotto della massa totale del sistema per il doppio dell'altezza di caduta".

Da un punto di vista moderno il secondo membro esprime il lavoro fatto dalle forze agenti sul sistema. In questo senso l'equazione è formalmente equivalente al teorema delle forze vive di D'Alembert. Una definizione del risultato è la seguente: "quando un numero arbitrario di masse considerate puntiformi si muove sotto l'influenza di forze dovute solo alle loro mutue interazioni o di forze dirette verso centri fissi, la somma delle quantità di *vis viva* per tutte le masse puntiformi è la stessa ad ogni istante nel quale i punti hanno la stessa posizione relativa tra loro o rispetto ai centri fissi, indipendentemente dai cammini seguiti e dai cambiamenti di velocità durante il moto".

Il rapporto tra "forze vive" e forze esterne è dato dalla considerazione della variazione della *vis viva*: la variazione di *vis viva* tra A e D è indipendente dalla traiettoria (AD o ABCD) e dipende solo dalle distanze relative al centro di attrazione E (C e D sono alla stessa distanza). Il lavoro fatto lungo un cammino chiuso è nullo; il lavoro è un differenziale esatto.

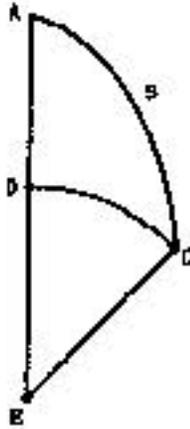


Fig. 11 Esempio di D. Bernoulli

In questo caso le forze dipendono da un potenziale, cioè da una funzione scalare delle coordinate. D. Bernoulli fu infatti il primo ad introdurre la funzione potenziale. In questo caso la variazione della forza viva è uguale alla variazione del potenziale.

Ma qual'è l'utilità della connessione operata da D. Bernoulli del teorema della conservazione della forza viva di Huygens con gli effetti delle forze esterne, alla maniera del teorema delle forze vive di D'Alembert?

Il vantaggio è che questo principio fornisce immediatamente un'equazione che lega la velocità dei corpi del sistema in esame con le variabili che determinano la sua posizione nello spazio. Quando tutte le variabili si riducono ad una, è sufficiente risolvere l'equazione per questa variabile. Questo è il caso con il centro di oscillazione.

Pertanto si era ottenuto all'interno della meccanica un risultato di grande valore e formalmente valido ancora oggi. L'interpretazione concettuale però era fortemente restrittiva: si restava sempre nell'ambito dei teoremi validi solo per la meccanica e non di principi generalizzabili a tutta la fisica. Ciò è particolarmente esplicito in Lagrange. Egli infatti deriva dal principio degli spostamenti virtuali la legge seguente:

$$S [(dx/dt)^2 + (dy/dt)^2 + (dz/dt)^2 + 2p] m = 2H$$

nella quale H denota una costante arbitraria, uguale al valore del primo membro dell'equazione ad ogni istante, i termini quadratici rappresentano la *vis viva* e p una funzione delle coordinate dei corpi costituenti il sistema

Da un punto di vista moderno è facile discernere in questa espressione la conservazione dell'energia meccanica: energia cinetica+potenziale=costante, ma questa non è l'interpretazione concettuale di Lagrange. Egli parla di conservazione della forza viva nel senso di Huygens (indipendenza dai vincoli e quindi dalle traiettorie) ed è ben conscio che la *vis viva* non si conserva durante il moto. Si è dunque ancora ben lontani dall'idea di conservazione dell'energia:

"Quest'ultima equazione esprime il principio noto come la conservazione della forza viva Poiché la somma dei primi tre termini in parentesi è il quadrato della velocità risultante della particella, che moltiplicata per m diventa la forza viva. La somma di tutti questi termini

per tutti i corpi del sistema è la forza viva dell'intero sistema. Questa forza viva è uguale alla quantità $2H-2Spm$, che dipende semplicemente dalla forza acceleratrice che agisce sui corpi del sistema e non dipende affatto dalle loro mutue connessioni (cioè, dalle forze interne). Pertanto la forza viva del sistema è ad ogni istante la stessa di quella che i corpi avrebbero acquisito se, sottoposti alle stesse forze, si fossero mossi liberamente, ognuno sulla sua specifica traiettoria. E' proprio questo che ha giustificato l'attribuire il nome di conservazione della forza viva a questa proprietà del moto".

Mi sembra pertanto chiaro che nella tradizione newtoniana l'aspetto analitico del teorema delle forze vive era perfettamente acquisito. Ma gli stessi aspetti che avevano determinato la prevalenza della tradizione newtoniana su quella leibniziana dovevano rivelarsi ad un certo stadio delle limitazioni. Senza l'ausilio fornito da un principio metafisico i teoremi analitici sono privi di potere euristico. Nello stesso tempo però i principi metafisici necessitano di modelli specifici per essere applicati utilmente.

Pur nella differenza tra l'approccio legato al teorema di conservazione della *vis viva* e l'approccio di Leibniz caratterizzato in maniera più "metafisica", è opportuno ribadire che entrambi sono radicalmente differenti da quello di Newton.

Newton infatti dà origine ad una tradizione di fisica delle traiettorie: con le sue leggi, forze dipendenti dalle posizioni dei corpi determinano in ciascun istante la variazione delle velocità di tali corpi. Questa tradizione non contiene riferimenti espliciti ad una conservazione: i corpi accelerano o decelerano senza che si sia stabilito alcun bilancio, senza identificare in cosa la causa di una accelerazione sia stata diminuita dall'accelerazione che essa ha prodotto. A Newton, infatti, era estranea l'idea di conservazione del mondo come sistema autoconsistente: come già ricordato a suo modo di vedere le forze sono una testimonianza dell'attività divina rinnovantesi senza posa che anima il mondo e che, con la materia inerte, costituisce la natura.

A partire dall'analisi galileiana della legge di caduta si afferma invece una tendenza che è legata all'equivalenza tra causa ed effetto che si svela nella reversibilità dei moti: dal problema che le misurazioni danno solo velocità medie e non velocità istantanee, la legge di caduta viene determinata sulla base dell'assunto che la forza acquisita in ogni istante di una caduta, deve essere esattamente quella che permetta ad un corpo di risalire alla stessa altezza, indipendentemente dalla traiettoria percorsa. La causa dunque equivale all'effetto ed il processo è reversibile, tale reversibilità è strettamente collegata alla impossibilità del moto perpetuo, come abbiamo visto anche nel caso di Huygens.

Pertanto qui l'indipendenza dalle traiettorie assume un significato determinante: il moto di un corpo è descritto come l'evoluzione della sua capacità di produrre un movimento, cioè di imprimere ad un altro corpo un movimento che gli permette di superare una distanza determinata contro una forza: (capacità di produrre un lavoro). Un tale approccio non tiene conto della traiettoria seguita da un corpo ma unicamente di ciò che, in questa traiettoria, ha provocato una crescita o una diminuzione di tale capacità: nel nostro caso solo i cambiamenti di altezza sono pertinenti e non i percorsi effettuati. La fisica delle traiettorie e la fisica della conservazione formano pertanto due tradizioni distinte nel XVIII secolo.

La Meccanica applicata alle macchine

LO SVILUPPO DELLE MACCHINE A VAPORE

Quasi contemporaneamente all'abbandono della componente metafisica (1750) della conservazione un altro importante elemento entra con forza nella nostra storia, un elemento che in origine è legato più alla tecnologia che non alla scienza: la macchina a vapore.

Fig. 12 Pompa di G. B. della Porta

Già Erone il Vecchio d'Alessandria aveva descritto, nel 120 a.C., una sfera rotante a vapore in cui si può riconoscere il primo rudimentale esempio di turbina a vapore "a reazione" e G. B. della Porta nel 1601 ideò un congegno nel quale la pressione del vapore, agendo in un recipiente chiuso, era impiegata per sollevare acqua. Ma fino al 1643, cioè fino alla scoperta della pressione atmosferica da parte di Torricelli, non vi furono grandi interessi o sviluppi.

Fra le prime e più importanti macchine a vapore per uso industriale ricordiamo quelle di Savary, Newcomen e Watt.

La macchina di Savary (1698) non era altro che una pompa in cui il colpo verso il basso veniva dato dalla pressione del vapore e quello verso l'alto dalla condensazione del vapore tramite un getto di acqua fredda. Questa pompa era destinata ad aspirare l'acqua dalle miniere.

La macchina di Newcomen è del 1705. La pressione atmosferica era utilizzata per fare abbassare il pistone allorché nel cilindro, riempito di vapore, si creava un vuoto tramite un getto di acqua fredda. Un contropeso faceva risollevarlo il pistone e iniziare un nuovo ciclo. L'innovazione fondamentale consisteva nell'aver separato la caldaia dal cilindro.

Fig. 13 La macchina a vapore di Newcomen

Watt nel 1763 notò che la quantità di vapore necessaria al funzionamento di una tal macchina era enorme. Egli misurò che per ogni rivoluzione veniva consumata una quantità di vapore pari al volume di 8 cilindri. In pratica $\frac{7}{8}$ della quantità di vapore servivano a riscaldare il cilindro ad ogni ciclo ed $\frac{1}{8}$ a far funzionare la macchina. Di qui la geniale idea di far condensare il vapore in una camera separata, costantemente sottovuoto.

Il grande vantaggio del condensatore fu quello di separare le parti calde e quelle fredde della macchina. Un secondo miglioramento fu quello di alzare la pressione del vapore al di sopra di quella atmosferica, così che il vapore potesse "spingere" mentre il vuoto "tirava". Infine il vapore fu portato alternativamente da entrambi i lati del pistone in modo da raddoppiare la capacità della macchina. Con successivi miglioramenti si ebbe un'economia d'esercizio di circa 8 volte rispetto alla macchina di Newcomen ed una serie di brevetti tra i più

importanti della rivoluzione industriale.

Fig. 14 Macchina a vapore progettata da James Watt nella riproduzione fatta da Biot in "Traité de physique"

Un contributo fondamentale di Watt alla teoria della macchine a vapore fu l'invenzione dell'indicatore: esso permetteva di conoscere la pressione in funzione del volume per ogni posizione del cilindro e pertanto di cominciare a tracciare dei diagrammi su questi assi cartesiani.

Di qui si affermerà l'importanza teorica del concetto di lavoro, forza per spostamento, ovvero pressione per volume, che nella pratica si era rivelato di così grande utilità. Il collegamento tra la tradizione tecnologica e quella teorica si deve a Lazare Carnot.

LAZARE E SADI CARNOT

Infatti non prima del 1782, nell'opera di Lazare Carnot *Essai sur les machines en général*, il prodotto della forza per la distanza cominciò a ricevere un nome e una priorità concettuale nella teoria dinamica. Né questa nuova visione dinamica del concetto di lavoro fu veramente sviluppata e accettata fino al 1820-40, quando venne approfondita nelle opere di Navier, Coriolis, Poncelet e altri autori interessati al problema delle macchine in moto. Pertanto il lavoro, l'integrale della forza sulla distanza, è il loro parametro concettuale fondamentale. Venne dunque definito il lavoro, le sue unità di misura ed il suo rapporto con la *vis viva*, che d'ora in poi sarà $1/2 mv^2$. Solo con questa riformulazione la conservazione della *vis viva* fornirà come vedremo un modello concettuale conveniente per la quantificazione dei processi di conversione.

Lazare Carnot, che era stato il riorganizzatore delle armate della Repubblica francese, era allo stesso tempo un ingegnere e fu l'autore di un trattato sulle macchine che ebbe all'inizio del XIX secolo una grande influenza sulla generazione dei primi testi di meccanica razionale per gli allievi delle grandi scuole di ingegneria apparse a quell'epoca.

Il tema centrale: affinché una macchina meccanica abbia il miglior rendimento bisogna che la sua costruzione ed il suo regime di funzionamento siano tali che gli urti, gli attriti, i cambiamenti bruschi di velocità, in breve tutto ciò che proviene dalla messa in contatto di corpi con velocità differenti, siano evitati al massimo. Se tutte le trasmissioni del moto tra le differenti parti della macchina hanno luogo in modo progressivo, senza discontinuità, il funzionamento meccanico conserva la forza viva; dopo un ciclo di funzionamento, quando la macchina ritorna al suo stato iniziale dopo aver restituito al mondo esterno il movimento che ha ricevuto, ha trasmesso al mondo una quantità di forza viva pari a quella che l'ha messa in moto. Tutti gli attriti, tutti gli urti, tutte le trasformazioni discontinue determinano una perdita senza ritorno di forza viva e un rendimento inferiore a uno.

Lazare Carnot precisò le condizioni ideali di funzionamento delle macchine meccaniche. Egli introdusse esplicitamente il concetto di lavoro nella tradizione della conservazione della forza viva e fu all'origine della rivalutazione di quel termine formale del teorema che non veniva particolarmente sottolineato.

Lazare Carnot precisò le condizioni ideali di funzionamento delle macchine meccaniche. Suo figlio Sadi risolse lo stesso problema per le nuove macchine di provenienza inglese: le macchine termiche. Molto precisa l'analisi di Prigogine:

Un motore termico è un dispositivo in grado di produrre lavoro usando calore. Un esempio è costituito dai motori a vapore, che hanno avuto larga diffusione durante la rivoluzione industriale e sono stati costantemente migliorati e adattati a nuovi compiti. Tuttavia in pratica non esisteva una teoria scientifica delle loro modalità di funzionamento. Sadi Carnot, cercando di consolidare le carenti basi teoriche, si pose l'interrogativo seguente: è possibile aumentare indefinitamente il rendimento di un motore termico, o esiste un limite al rendimento, insuperabile in linea di principio? Può esistere un agente più efficiente del vapore, usabile in un motore termico? In altre parole, il rendimento dipende dalla natura della sostanza attiva? E' essenziale che un motore termico abbia un'uscita e un ingresso di calore? Come è influenzato il rendimento dalla temperatura della sorgente dalla quale si estrae il calore?

Per rispondere a tali quesiti Carnot propose il principio che oggi porta il suo nome e che rappresenta la prima versione della seconda legge della termodinamica: la produzione di lavoro da parte di un motore termico deve sempre essere associata a un flusso di calore da un corpo a temperatura più alta a un altro corpo a temperatura più bassa. Questo processo di passaggio di calore da un corpo caldo a uno più freddo è descritto da Carnot come ristabilimento dell'«equilibrio del calore», o, servendosi di un termine più comune, ripristino dell'equilibrio termico. Carnot riteneva anche valido l'opposto: è possibile ottenere lavoro ogni qualvolta esista una differenza di temperatura e si possa ripristinare l'equilibrio termico. L'esistenza di *due* sorgenti di calore caratterizzate da una diversità di temperatura è quindi una condizione sufficiente e necessaria per la produzione di lavoro mediante calore. Va osservato immediatamente che, in base a questo principio, è impossibile far muovere un veicolo estraendo calore dall'ambiente col quale esso si trova in equilibrio termico. Altrimenti non avremmo bisogno di combustibile per azionare navi o aeroplani o automobili: essi potrebbero ricavare tutto il calore necessario dal mare o dall'aria e spostarsi per un periodo indefinito. La ragione dell'inesistenza di siffatte navi o automobili non risiede nell'incapacità dell'ambiente di fornire una quantità di calore sufficiente al loro funzionamento. Ciò che manca è una differenza di temperatura, un flusso di calore da un corpo caldo a uno freddo.

Forte di questo principio, Carnot si accinse quindi a esaminare le condizioni di massimo rendimento di un motore termico. Poiché il passaggio di calore da una temperatura più alta ad una più bassa può sempre produrre lavoro, ragionò Carnot, un trasferimento di calore senza produzione di lavoro, quale si verifica quando un corpo caldo e uno freddo sono posti a contatto diretto, equivale a uno spreco del lavoro che la cessione di calore avrebbe potuto generare. Un motore termico ideale deve quindi tendere a evitare una trasmissione diretta di calore lungo una differenza di temperature, onde produrre tutto il lavoro in teoria ottenibile. In altre parole nel motore termico ideale tutti i passaggi di calore si debbono realizzare tra temperature uguali e tutti i riscaldamenti o raffreddamenti nell'ambito del motore si debbono effettuare tramite cambiamenti di pressione-volume, senza flusso termico diretto. Questo motore ideale, secondo Carnot, non sarebbe affatto in grado di funzionare, in quanto il calore non fluirebbe nel motore senza una differenza di temperature, ma la minima deviazione dall'ideale, la più lieve diversità di temperatura sarebbero sufficienti ad azionare la macchina e al contempo a mantenere il rendimento vicino al valore massimo.

Fondandosi su queste considerazioni, Carnot descrisse il motore termico ideale. Il motore opera in cicli successivi, in modo che al termine di ciascun ciclo la macchina ritorni allo stato iniziale. Ogni ciclo è formato dagli stadi seguenti: 1) il motore riceve calore da un corpo A, di temperatura elevata T_1 (sfruttando la minima possibile differenza di temperatura); 2) il motore produce lavoro senza scambio termico, mentre la sostanza attiva si raffredda alla temperatura più bassa T_2 ; 3) si trasferisce calore dal motore a un serbatoio freddo B (la cui temperatura è quanto più vicina possibile a T_2); 4)

si spende lavoro per riportare la sostanza attiva alla temperatura più alta T_1 senza passaggio di calore. Il lavoro netto prodotto dal motore è la differenza tra quello guadagnato nella fase 2 e quello speso nella fase 4.

Un'osservazione cruciale per la comprensione del funzionamento dei motori termici, e fondamentale per la scienza della termodinamica in generale, è il collegamento, stabilito da Carnot, tra *reversibilità* del motore e rendimento. Il ciclo ideale di Carnot è completamente reversibile. Tutti e quattro gli stadi si possono realizzare in ordine inverso, naturalmente a patto che si spenda lavoro anziché ricavarne. La reversibilità del motore è una conseguenza delle precauzioni prese per evitare un riscaldamento o raffreddamento determinato da scambi termici. Se si fosse avuto un flusso termico diretto lungo un gradiente di temperatura, il ciclo non sarebbe stato reversibile, poiché l'operazione non avrebbe potuto verificarsi in senso opposto senza apportare determinate modifiche al funzionamento del motore. Ne deriva che il motore più efficiente è quello reversibile e che qualsiasi ciclo irreversibile è destinato a produrre meno lavoro di quello reversibile. Il miglior uso che sia possibile fare del calore si manifesta quindi in un processo reversibile. Naturalmente in pratica il processo reversibile ideale è inottenibile: non è possibile evitare completamente il contatto diretto tra corpi caldi e corpi più freddi. L'analisi teorica suggerisce però rigorosamente come si possa approssimare la situazione ideale.

L'analisi di Carnot si fonda soltanto sugli aspetti più generali e essenziali del motore termico. Nessun dettaglio di progettazione o materiale può quindi influenzarla. Dopo aver descritto il suo motore reversibile, egli fu in grado di dimostrare che nessun'altra macchina può avere un rendimento maggiore (ad esempio una macchina con una diversa sostanza attiva) e che nessun'altra macchina può compiere lo stesso lavoro con una minor quantità di calore. Egli dimostrò anche che il rendimento del motore è tanto più elevato quanto maggiore è la differenza di temperatura tra le sorgenti calda e fredda. La prova della prima affermazione è semplice e costituisce un esempio per molte altre prove avanzate dai seguaci di Carnot: "Se esistesse un metodo di impiego del calore preferibile a quello di cui ci siamo serviti, in altre parole se fosse possibile ottenere dal calore, con qualunque processo alternativo, una maggiore quantità di energia motrice... si potrebbe allora, dirottando una parte di questa energia, effettuare un riciclo di calore dal corpo B al corpo A, ovvero da refrigerante alla sorgente, e così ripristinare la situazione originaria in modo da dare il via a un'operazione esattamente simile alla prima, ripetendo il processo più volte. Ne deriverebbe non soltanto il moto perpetuo, ma un'illimitata creazione di energia motrice senza consumo di calore o di altro agente di sorta. Una simile creazione è completamente contraria alle idee oggi accettate, alle leggi della meccanica e della fisica razionale; è inammissibile" (Carnot, 1824, p. 11).

L'argomento citato è una *reductio ad absurdum*, ove l'assurdo è l'esistenza di un *perpetuum mobile*. Tuttavia l'attento lettore moderno non concorderebbe sul fatto che il processo descritto porti di fatto a un *perpetuum mobile*, ma si limiterebbe ad ammettere che fornisce un dispositivo capace di rimuovere calore da un serbatoio freddo senza spendere lavoro. Un dispositivo di questo genere non è un *perpetuum mobile* nel senso stretto del termine. Ad ogni modo, sappiamo che è impossibile costruire una macchina siffatta e l'argomentazione di Carnot è valida anche se il termine è usato leggermente a sproposito.

Com'è possibile spiegare questo abuso da parte di Carnot? Per rispondere bisogna domandarsi quale modello, quale quadro d'insieme avesse in mente Carnot nell'immaginare i suoi cicli ideali. La risposta la fornisce esplicitamente lui stesso: "In base a quanto stabilito possiamo correttamente confrontare l'energia motrice del calore con quella di una cascata - entrambe hanno un massimo invalicabile... che dipende dall'altezza e dalla quantità dell'acqua. Analogamente col calore... la forza motrice dipende dalla differenza di temperatura e dalla quantità di calore (calorico)". La teoria del calore riflessa in questa analogia è quella del calore considerato come sostanza. Secondo questa teoria, nel motore termico non si consuma in realtà calore, proprio come in una macchina che sfrutti una cascata non si consuma acqua è la *cascata* che produce il lavoro. Le opinioni degli storici della scienza divergono sul concetto carnotiano di calore. E' risaputo che Carnot nutriva seri dubbi sulla natura del calore e che col procedere degli anni si convertì alla teoria cinetica del calore (come rivelano i suoi scritti postumi). Alcuni storici credono di scorgere quest'ultima teoria nelle *Réflexions*, ma questa interpretazione, alla luce dell'analogia citata, sembra impossibile. Se la corrispondenza tra flusso di calore e caduta d'acqua fosse stata giustificata, il processo ipotetico di Carnot darebbe di fatto un *perpetuum mobile*. Per noi, che non accettiamo più l'analogia, il risultato non è un *perpetuum mobile*, ma piuttosto un tipo diverso di macchina impossibile: una macchina che

trasferisce calore da un corpo freddo ad uno caldo senza spendere lavoro. In pratica la costruzione di una simile macchina non è più probabile di quella di un *perpetuum mobile* "reale". E' quindi del tutto naturale che a questo tipo di macchina si sia dato il nome di "*perpetuum mobile* del secondo ordine".

L'analogia calore-acqua suggerita da Carnot non era casuale. All'epoca di Carnot era d'uso tra gl'ingegneri progettare motori ad acqua capaci di funzionare anche in senso *contrario*, ossia come pompe idrauliche. Il rendimento di una tale macchina era definito come rapporto tra la quantità d'acqua restituibile all'altezza originaria mediante il ciclo invertito e la quantità totale di acqua motrice. Si sapeva che il motore idraulico ideale era quello completamente reversibile. Una macchina con rendimento superiore a quella reversibile è un *perpetuum mobile*. Poiché la teoria più diffusa sul calore era a quell'epoca la teoria calorica, è perfettamente naturale che Carnot abbia fondato la sua analisi sull'analogia calore-acqua. E' abbastanza interessante notare che nella derivazione dei risultati nulla dipende realmente dall'analogia. Carnot (forse a causa dei suoi dubbi) espone l'argomento con tale prudenza che tutti i risultati sono fondamentalmente corretti, anche se ben presto il presupposto, o meglio il modello retrostante al presupposto, si dimostrò inadeguato. (*Enciclopedia Einaudi: voce Energia*)

In un'interessante analisi del lavoro di Carnot, Planck si chiede se Carnot accettasse o meno la conservazione dell'energia. Per Planck il problema si deve scindere in due aspetti: da una parte l'accettazione dell'impossibilità del *perpetuum mobile* e del suo contrario, dall'altra la misura del valore equivalente del lavoro compiuto. Abbiamo visto che sia Cartesio che Leibniz accettavano il primo aspetto e discordavano sul secondo. Una situazione analoga vale per Carnot. Infatti per Carnot nella generazione di lavoro tramite calore si considera come compensazione del lavoro eseguito il passaggio di calore da una temperatura più alta ad un'altra più bassa; pertanto l'equivalente del lavoro è il prodotto del calore per una certa differenza di temperatura. Da questo punto di vista Planck afferma che Carnot era certamente un precursore del principio di conservazione e che il suo errore consisteva solo nel tipo di processo individuato per definire la compensazione del lavoro prodotto. Anche su questa base però si poteva calcolare un valore equivalente. Pertanto, conclude Planck, la teoria del calorico non è in contraddizione con la conservazione

dell'energia ma con la specifica definizione di energia. Per questa teoria l'energia sarebbe uguale al calore per una differenza di temperatura. Sarà un motivo sperimentale a far scomparire le teorie del calorico: la quantità di calore varia, essa non è invariata nei processi di natura; si può creare e distruggere calore. Sono proprio i problemi implicanti il rapporto tra lavoro e calore e quindi l'estensione del concetto di energia al di là dell'ambito della meccanica che permisero una definizione abbastanza rigorosa ed esplicita del concetto stesso nella prima metà dell'ottocento e portarono all'enunciazione della legge di conservazione dell'energia. Vale dunque la pena di ricordare il dibattito sulla natura del calore, legato strettamente alla soluzione dei problemi suddetti.

CALORE: SOSTANZA O MOVIMENTO?

Le concezioni che si fronteggiarono per alcuni secoli erano essenzialmente due: il calore come sostanza e il calore come movimento. La prima traeva spunto dalle concezioni aristoteliche: il fuoco era infatti uno dei quattro elementi; ed anche da quelle degli atomisti greci: la sostanza costituente il calore veniva infatti immaginata come qualcosa di molto più fluido della materia ordinaria, a carattere continuo o discontinuo, capace di diffondersi attraverso i corpi e presumibilmente dotata di peso.

Un po' alla volta si cominciò a ritenere questo un fluido imponderabile e simile all'etere di Cartesio e alle altre specie di etere o fluidi imponderabili che tra il '600 e l'800 venivano utilizzati per spiegare, all'interno di concezioni meccaniciste legate allo spazio pieno, la gravitazione o la propagazione della luce o la trasmissione delle forze elettriche o magnetiche. Dall'altro punto di vista, quello che considerava il calore come movimento o come effetto del movimento, si collocarono tutta una serie di scienziati del '600, ad es. Galileo, Bacon, Boyle, Hooke, Newton, che tentarono di ricondurre il calore al vibrare delle particelle atomiche dei corpi riscaldati, cioè in definitiva alla concezione meccanicista che assumeva l'esistenza di uno spazio vuoto e di particelle atomiche collocate in esso. Le argomentazioni tuttavia erano abbastanza vaghe, come ad esempio quella che il calore poteva essere generato dal movimento per frizione. Durante tutto il '600 e per buona parte del '700 questo contrasto tra le due teorie, che ricorda il contrasto incontrato in ottica tra la teoria corpuscolare e quella ondulatoria della luce, rimase irrisolto e ciò, come notano Holton e Brush, per un duplice motivo: da una parte per l'assenza di alcuni concetti teorici (calore specifico, calore latente, differenza tra calore e temperatura) e dall'altra per lo scarso sviluppo di metodi termometrici e calorimetrici.

Un'acquisizione di notevole valore fu fatta però nella prima metà del '700: "il calore non si crea nè si distrugge", ossia, in termini moderni, la legge di conservazione del calore. Questa legge sperimentale ricavata da esperimenti su misture, dove corpi di varie temperature erano messi a contatto, indicava che qualunque fosse la redistribuzione di calore tra i vari corpi, la quantità totale di calore restava costante. Questa fondamentale legge della calorimetria diede forte impulso alla corrente sostanzialistica del calore, per la sua analogia con la legge della conservazione della materia, che era comunemente accettata. Infatti l'interpretazione di tale legge sperimentale nel quadro teorico sostanzialistico era agevole: quando due corpi riscaldati in maniera diversa sono posti in contatto l'eccesso di "fluido calore" passerà dal più caldo al più freddo finché non si raggiunga un equilibrio. Evidentemente per l'altra concezione della natura del calore, a quell'epoca, era difficile dare una spiegazione altrettanto semplice. In seguito anche agli sviluppi della chimica della fine del '700 si affermò dunque la concezione del calore come sostanza: ad essa venne dato da Lavoisier, fervente sostenitore di questa teoria, il nome di "calorico" in un famoso brano del primo capitolo del *Traité élémentaire de chimie* (1789).

La plausibilità dell'ipotesi del calorico si accrebbe notevolmente quando al fluido furono assegnate due proprietà: le particelle del calorico si respingono tra loro ed sono attratte dalla materia ordinaria; in tal modo ad esempio venivano spiegate le dilatazioni termiche (le particelle di calorico circondano le particelle di materia e si respingono tra loro). In definitiva tale teoria ebbe un notevole sviluppo e fu considerata vincente dalla maggior parte dei fisici della fine del '700.

Va notato però che tale teoria assumeva due ipotesi implicite di una certa rilevanza, ipotesi che una volta esplicitate si sarebbero rivelate dei punti deboli della teoria: la prima assunzione riguardava l'imponderabilità del calorico e la seconda che il calorico si conserva in tutti i processi termici.

Fu B.Thompson, più conosciuto come conte Rumford, che stabilì con una rigorosa (per l'epoca) precisione sperimentale nel 1799 che il calorico andava definitivamente considerato imponderabile, ove mai esistesse. Si riapriva così una questione già dibattuta ad esempio da Newton contro Cartesio, da Galileo contro gli Scolastici, e cioè se la scienza potesse accettare l'esistenza di una sostanza dotata di caratteristiche materiali, ad es. di struttura atomica, però non dotata di peso.

Il problema è abbastanza delicato e certo la scelta tra le due teorie sulla natura del

calore non poteva essere fatta soltanto su questa base: a coloro che non volevano accettare una sostanza senza peso si opponevano coloro che non volevano accettare l'eterno tremare dei corpuscoli. Dal punto di vista metodologico odierno basti notare che non si possono accettare solo concetti scientifici direttamente riconducibili a misurazioni. In questo senso l'accettare l'ipotesi del calorico poteva essere corretto: la teoria cui dava luogo permetteva corroborazioni indirette.

Dall'altra parte anche l'opposizione di Rumford, ad esempio, alla teoria del calorico non era frutto di un atteggiamento metodologicamente ingenuo: faceva parte di un programma di ricerca mirante a mostrare le inconsistenze della prima concezione del calore a vantaggio della seconda.

Rumford infatti nel 1798 mostrò che la quantità di calore prodotto per frizione è enorme, addirittura senza limiti. Rumford pertanto riteneva impossibile che un corpo isolato potesse fornire indefinitamente qualcosa che potesse essere considerato una sostanza materiale e pertanto asseriva che la natura del calore doveva identificarsi con il movimento.

Agli inizi dell'800 la teoria di Rumford si trovava ancora in una situazione di inferiorità: nonostante potesse dar conto della normale espansione termica, della conducibilità, dei cambiamenti di stato, ecc. non riusciva a spiegare altrettanto bene della teoria del calorico né la conservazione del calore in quei casi in cui con un opportuno isolamento la quantità di calore resta costante, senza produzione né conversione, né il fenomeno del calore radiante: la propagazione del calore nello spazio vuoto sembrava incompatibile con la concezione del calore come modo del movimento di materia.

A questo punto il dibattito si collega al dibattito sulla natura della luce, corpuscolare o ondulatoria, per le affinità del calore radiante con la luce. Dopo i lavori di Young e Fresnel si affermò la teoria ondulatoria della luce il che diede impulso ad abbandonare la teoria del calorico, anche se questo sembra reincarnarsi nel concetto di etere. E' importante comunque che, grazie anche alla teoria ondulatoria della luce, il calore adesso viene definito come una forma di energia, ed infatti l'uso della parola energia in senso moderno data dal 1807.

PROCESSI DI CONVERSIONE E FILOSOFIA ROMANTICA DELLA NATURA

Nella prima metà dell'800 sotto la spinta di diversissime sollecitazioni si fa strada l'idea che molti campi di indagini siano ricollegabili in un unico punto di vista, idea che contribuirà alla formazione del principio di conservazione dell'energia.

Tale idea ha due fondamentali radici: una di carattere sperimentale ed una di carattere profondamente filosofico.

E' dall'800 infatti che con la scoperta della pila da parte di un altro famoso professore della nostra Università, A.Volta, comincia ad esserci una disponibilità pratica di processi di conversione. In accordo alla teoria del galvanismo prevalente in Francia ed in Inghilterra, la corrente elettrica era essa stessa guadagnata a spese di forze di affinità chimica. Questa conversione non era che la prima: correnti elettriche producevano sempre calore e, sotto appropriate condizioni anche luce. Oppure, tramite elettrolisi, la corrente poteva vanificare forze di affinità chimica, chiudendo così il ciclo delle trasformazioni.

Ma ulteriori processi di conversione erano alle porte: nel 1820 il danese Oersted mostrò gli effetti magnetici della corrente; il magnetismo a sua volta poteva produrre movimento ed il movimento notoriamente produceva elettricità (per frizione). Nel 1822 Seebeck mostrò che il calore applicato ad una giunzione bimetallica produceva direttamente

corrente. Dodici anni dopo Peltier mostrò la conversione inversa: la corrente poteva, talvolta, assorbire calore. Nel 1831 Faraday scoprì la possibilità di ottenere correnti indotte e Melloni in quegli anni avrebbe mostrato l'identità della luce e del calore radiante.

Alcune conversioni erano già note da tempo, ma nella prima metà dell'800 esse cessarono di essere fenomeni isolati per divenire una tematica fondamentale della ricerca scientifica: la connessione di tutte le scienze fisiche. A questo doveva contribuire la tradizione filosofica su. menzionata: la filosofia romantica della natura. La metafisica dell'equivalenza tra causa ed effetto, l'unità profonda di tutti i fenomeni naturali riprendono vigore in campo filosofico ed influenzano la ricerca di numerosi fisici. Valga per tutte una citazione da Schelling: "i fenomeni magnetici, elettrici, chimici ed anche quelli organici sono interconnessi in una grande unità...(che) si estende a tutta la natura". Anche prima della scoperta della pila aveva insistito che "senza dubbio solo una unica forza nei suoi vari aspetti si manifesta nella luce, elettricità e così via". Molti degli scienziati più strettamente legati alla scoperta della conservazione dell'energia furono influenzati da questa corrente filosofica: Kuhn ne conta sette su dodici (Mayer, Colding, Helmholtz, Holtzman, Liebig, Hirn, Mohr; gli altri: Grove, Faraday, Carnot, Joule, Seguin).

Nonostante questo nuovo, o rinnovato, punto di vista un preciso approccio alla conservazione dell'energia era ancora un compito difficile. Conversione infatti non vuol dire conservazione: la quantificazione della conservazione dell'energia si rivelò particolarmente difficile per quei pionieri il cui bagaglio culturale si basava sui recenti processi di conversione. Grove pensava di aver trovato la chiave della quantificazione nella legge di Doulong e Petit che legava l'affinità chimica ed il calore. Mohr credeva di aver trovato la relazione quantitativa nell'uguagliare il calore impiegato ed alzare la temperatura dell'acqua di un grado con la forza statica necessaria a comprimere la stessa acqua al suo volume originario. Mayer dapprima tentò di misurare la "forza" unitaria con la quantità di moto.

Ci voleva qualcosa in più, e fu proprio Mayer, con Joule ed Helmholtz, ad offrire uno dei contributi fondamentali.

LA CONSERVAZIONE SECONDO MAYER: L'EQUIVALENZA CALORE - LAVORO

In Germania nella prima metà dell'800 il problema dei rapporti tra produzione di calore e movimento meccanico fu affrontato anche dal punto di vista chimico e biologico. Già Lavoisier aveva mostrato che il rapporto tra la quantità di calore e la quantità di ossido di carbonio emesse dagli animali era circa uguale al rapporto tra il calore e l'ossido di carbonio prodotti dalla fiamma di candela. Appariva così verosimile che il calore delle creature a sangue caldo derivasse dall'energia chimica sprigionata dalla combustione del loro cibo. Liebig (1803-1873), che aveva studiato a Parigi all' *Ecole Polytechnique* con Gay Lussac, avanzò l'ipotesi che anche l'energia meccanica degli animali, non meno del calore del loro corpo, potesse derivare dall'energia chimica prodotta dal cibo. Le opinioni degli scienziati tedeschi su tale questione erano divise, giacché alcuni sostenevano che le attività degli organismi dipendessero da una forza vitale peculiare agli esseri viventi, ossia sostenevano la concezione vitalistica. Un allievo di Liebig, Friedrich Mohr (1806-1879) adottò la concezione meccanicistica, dalla quale derivò l'idea che tutte le varie forme di energia fossero manifestazioni di forza meccanica. Nel 1837 Mohr scriveva: "Oltre ai 54 elementi chimici conosciuti esiste nella Natura soltanto un unico altro agente, e questo viene chiamato col nome di forza; a seconda delle condizioni, esso può manifestarsi come movimento, come coesione, come elettricità, come luce, come calore e

come magnetismo... Il calore, pertanto, non è una particolare sorta di materia, ma è un movimento oscillatorio delle più piccole particelle costituenti i corpi."

Quest'idea fu enunciata ancora una volta nel 1842 da Robert Mayer (1814-1878), un medico di Heilbronn in Baviera in un suo saggio. Questo saggio, pieno di geniali generalizzazioni esposte però in maniera essenzialmente metafisica con poco risalto ai pur presenti e fondamentali risultati sperimentali, fu rifiutato da Poggendorf, direttore della principale rivista di fisica tedesca, e fu infine pubblicato sugli "Annalen der Chemie und Pharmacie" diretti da Liebig e da Mohr. In seguito Mayer disse di essere stato stimolato alle sue considerazioni teoriche dall'osservazione fatta su una nave in regioni tropicali: il sangue venoso dei suoi pazienti presentava un colore rosso più intenso di quello che aveva riscontrato in Europa; Egli attribuì tale differenza alla maggiore quantità di ossigeno presente nel sangue venoso in condizioni tropicali, e l'eccesso di ossigeno ad una diminuzione della combustione del cibo che forniva calore al corpo. Il fenomeno sembrava confermare l'idea che il calore del corpo provenisse dall'energia chimica prodotta dal cibo: Mayer avanzò allora l'ipotesi che anche l'energia meccanica dei muscoli derivasse dalla stessa fonte, e che l'energia meccanica, il calore e l'energia chimica fossero equivalenti e reciprocamente convertibili. E' estremamente interessante comunque esaminare la memoria di Mayer indipendentemente dalla veridicità dell'osservazione riportata, perché testimonia l'importanza degli stimoli filosofici alla ricerca scientifica e perché in questo caso le idee dei filosofi della natura tedeschi diedero vita a un risultato concreto, certamente all'altezza degli analoghi casi di Oersted, Seebeck e Faraday. In fine va notata la straordinaria somiglianza dell'ipotesi che Mayer pone esplicitamente all'inizio della sua memoria: *causa aequat effectum* con la prima ipotesi che Leibniz pone, anch'egli esplicitamente, all'inizio della sua memoria sulla conservazione della forza viva, ipotesi che come nota giustamente E.Cassirer, equivale proprio al principio che le cause equivalgono agli effetti.

Mayer infatti così si esprime: "Le forze sono le cause: pertanto possiamo ad esse applicare pienamente il principio fondamentale che: *Causa aequat effectum*. Se la causa c ha l'effetto e , allora $c=e$.

"In una catena di cause ed effetti, un termine o una parte di un termine non può mai annullarsi. Questa prima proprietà di tutte le cause è chiamata la loro indistruttibilità. (...) Dato che c si trasforma in e ed e in f , ecc., dobbiamo considerare queste varie grandezze come forme differenti sotto le quali una e la stessa entità fa la sua apparizione.

"Questa capacità di assumere varie forme è la seconda proprietà essenziale di tutte le cause. Prendendo insieme le due proprietà, possiamo dire, le cause sono entità quantitativamente indistruttibili e qualitativamente convertibili. (...) Le forze pertanto sono entità indistruttibili e convertibili". Si nota subito, a parte ancora l'uso del vocabolo forza invece che energia, l'espressione in forma qualitativa del principio di conservazione dell'energia, la prima espressione esplicita. Ovviamente fin qui l'interesse per noi è ancora molto scarso mancando uno specifico supporto sperimentale al quale agganciare simili considerazioni teorico-filosofiche, e probabilmente Poggendorf non riuscì in un clima di reazione positivista al dilagare della filosofia della natura, a cogliere tutti gli aspetti della geniale memoria di Mayer. Mayer infatti pur non essendo uno sperimentale e non producendo quindi prove specifiche, sulla base della sua impostazione teorica riesce a reinterpretare esperimenti precedenti e tali reinterpretazioni serviranno per lui come "illustrazioni pratiche" del suo punto di vista. Ancora una volta quindi va notata la complessità della metodologia scientifica e la mancanza di una netta separazione tra esperimenti e teorie. Infatti Mayer così prosegue: "In numerosi casi vediamo che un moto cessa senza aver causato un altro moto o il

sollevamento di un peso; ma una forza una volta esistente non può annullarsi ma può solo cambiare la sua forma. Sorge allora il problema: quale altra forma può essere assunta dalla forza che designano come forza di caduta o moto (energia potenziale e cinetica)? Solo l'esperienza ci può informare su questo punto. Al fine di fare fruttuosi esperimenti in questo campo, dobbiamo scegliere strumenti che mentre fanno sì che il moto si arresti siano essi stessi modificati dagli oggetti in esame". Mayer inoltre fa specifico riferimento ai due antichissimi principi: "dal niente non si crea niente" e "niente si può distruggere".

Segue l'argomentazione che se il calore è generato ad es. dal moto di due superfici per attrito, il calore pertanto deve essere equivalente al moto. Naturalmente l'idea che il calore è una forma di moto, come abbiamo visto, aveva una lunga storia ed era stata generalmente accettata nell'ultimo decennio. Ma Mayer non attribuisce al moto una priorità rispetto alle altre forme di energia: egli semplicemente e mirabilmente conclude: "Se la forza di caduta e il movimento sono equivalenti al calore, il calore deve anche essere ovviamente equivalente alla forza di caduta e al movimento.". E infine: "Conchiuderemo la nostra disquisizione, le cui proposizioni sono risultate come conseguenze necessarie del principio *causa aequat effectum* e che sono in accordo con tutti i fenomeni della natura, con una deduzione pratica...Quanto è grande la quantità di calore che corrisponde a una data quantità di energia cinetica o potenziale?" Siamo arrivati dunque al punto cruciale e la risposta di Mayer a questa domanda non ci lascerà delusi, anche se la linea dell'argomentazione quantitativa non è sufficientemente esplicitata nella memoria

Mayer parte da dati già noti, reinterpretrandoli (procedimento simile a quello ad es. seguito da Einstein rispetto all' "indizio negletto": $mi=mg$) in particolare da quelli relativi ai calori specifici per i gas: c_p e c_v . In particolare per l'aria $c_v = 0,17 \text{ (cal/g) } ^\circ\text{C}$ e $c_p = 0,24 \text{ (cal/g) } ^\circ\text{C}$ la differenza tra i due calori specifici indica che l'espansione di un gas è associata con uno scambio di calore con l'esterno, e ciò era noto in generale agli scienziati del primo '800. Ciò che non era molto noto era che se un gas si espande liberamente nel vuoto (invece che ad es. spingere un pistone) allora non c'è scambio di calore con l'esterno, cioè non c'è raffreddamento.

Ciò fu mostrato da Gay Lussac nel 1807 e fu confermato da Joule nel 1845. In qualche caso fu osservato un leggerissimo raffreddamento, ma il cambiamento di temperatura fu sempre di gran lunga minore di quello sperimentato con un gas in espansione contro un pistone. Mayer usò l'esperimento dell'espansione libera di Gay Lussac per convalidare la sua argomentazione che il calore effettivamente scompare quando si compie lavoro meccanico.

Secondo la teoria del calorico quando un gas si espande la sua temperatura diminuisce perché il calorico si spande su un volume maggiore, ma si supponeva che la quantità totale di calorico restasse invariata. Comunque Mayer evidenziò che la temperatura diminuisce solo quando il gas compie lavoro meccanico spingendo un pistone, ad es., se non viene compiuto alcun lavoro la temperatura resta la stessa

Pertanto l'abbassarsi della temperatura che si verifica quando un gas compie un lavoro non può essere spiegata dicendo che la stessa quantità di calorico si spande su un volume maggiore: si deve assumere che il calore effettivamente scompare quando viene compiuto del lavoro.

Mayer assunse che, dato $c_p= 0,24$ e $c_v=0,17$, le $0,17$ calorie necessarie a fare aumentare di 1°C la temperatura fossero le stesse in entrambi i casi e che le $0,07$ calorie di differenza servissero, nel caso della pressione costante, a muovere il pistone contro la pressione atmosferica (retrospettivamente si può dire che tutto ciò era implicito già nel lavoro di Gay Lussac). Calcolando il lavoro compiuto si ottengono circa $0,286 \text{ joules}$ dalle $0,07$

calorie. Cioè l'equivalente meccanico di 1 caloria sono circa 4 *joules*. Mayer diede un valore corrispondente a 3,6 *joules* straordinariamente vicino a quello attuale di 4,18 *joules*, considerando gli esperimenti del 1807 sui quali si basavano i suoi conti.

Per circa un decennio fu data pochissima attenzione al lavoro di Mayer soprattutto perché il suo stile di ragionare, di tipo filosofico, risultava ostile a coloro che si erano abituati a definire la scienza in termini di calcoli matematici ed esperimenti quantitativi. Inoltre non ci si trovava in una situazione di crisi riconosciuta che poteva essere risolta dalle nuove idee; invece egli stava presentando un nuovo punto di vista che poteva unificare varie branche della fisica e l'utilità di questa impostazione non era direttamente evidente. Notiamo brevemente che Mayer continuò a precisare e ad estendere i suoi lavori sul principio di conservazione per tutta la vita e che, dopo aver contratto una malattia mentale per la disperazione dei continui rifiuti da parte della comunità scientifica, verso la fine della sua vita fu infine acclamato come uno dei padri del principio suddetto.

Joule e l'equivalente meccanico

IL PRINCIPIO (MECCANICISTA) DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA

Un'altro tedesco che giunse all'idea della conservazione e della reciproca conversione delle varie forme di energia, partendo da un punto di vista biologico, fu Hermann Helmholtz (1827-1894), professore di fisiologia a Königsberg e poi di fisica a Berlino. Contrapponendosi ai vitalisti, Helmholtz sosteneva che gli organismi viventi sarebbero stati macchine in movimento perpetuo qualora avessero derivato altra energia da una forza vitale specifica oltre all'energia ottenuta dal loro cibo. Il principio dell'impossibilità del moto perpetuo indicava allora che gli animali ottenevano la loro energia soltanto dal cibo: così l'energia chimica prodotta dal cibo doveva convertirsi in una quantità equivalente di calore e di lavoro meccanico.

Helmholtz riteneva inoltre che se il calore e le altre specie di energia altro non erano se non forme di movimento meccanico, in base alla legge di conservazione della forza viva stabilita come abbiamo visto nel '600 e '700, seguiva il principio che la quantità totale dell'energia contenuta nell'universo era costante. Il primo articolo di Helmholtz sul principio della conservazione dell'energia come già gli altri articoli di Mohr e di Mayer, venne rifiutato da Poggendorf e pubblicato altrove. Altro particolare interessante è l'età dei tre più famosi tra i numerosi padri del principio di conservazione: Mayer nel '42 aveva 28 anni, Helmholtz nel '47, anno di pubblicazione della famosa memoria *Sulla conservazione della forza*, aveva 26 anni e Joule nel '43 aveva 25 anni.

L'apparato culturale del ventiseienne Helmholtz in particolare era veramente straordinario: egli da giovane aveva letto le opere di Newton, Eulero, d'Alembert e Lagrange; era ben consapevole della duplice tradizione in meccanica, del fatto che il concetto centrale nella meccanica newtoniana-vettoriale era il concetto di forza e che nessun principio di conservazione era alla base della struttura concettuale newtoniana. Nello stesso tempo la quantità che si conservava nella meccanica scalare lagrangiana era la somma della "forza viva" e della "funzione potenziale". Per eredità intellettuale, come nota Elkana, Helmholtz era un discepolo di Kant e tendeva a credere nell'esistenza di grandi forze unificatrici in natura; sempre secondo Elkana, questa convinzione assunse in lui la forma di leggi di conservazione, e

naturalmente l'entità che si conservava doveva essere quell'entità vagamente definita che veniva designata col nome di *Kraft* (forza). Tutto ciò era in completa armonia con la sua filosofia meccanica: una convinzione che tutti i fenomeni naturali siano riducibili alle leggi della meccanica. Inoltre per formazione accademica Helmholtz era un medico e operò vari anni nel laboratorio del famoso fisiologo J. Muller. Qui si trovò ad affrontare, come ricordato prima, il problema delle "forze vitali" e specialmente quello del calore animale. Anche qui la sua impostazione fu che le "forze vitali" devono essere riducibili a forze meccaniche. Infine Helmholtz a differenza di Mayer e Joule era un matematico di primo piano. Egli vide molto chiaramente che se la *Kraft* si conserva in natura e l'energia meccanica si conserva in meccanica, ogni *Kraft* deve avere le medesime dimensioni fisiche dell'energia meccanica e deve essere inoltre riducibile a questa. Questo programma fu per l'appunto realizzato nel lungo saggio del 1847.

Helmholtz introduce il Principio di Conservazione della Forza Viva in modo analogo alla tradizione di Huygens. In termini moderni egli definisce la *vis viva* di un sistema conservativo come una funzione della posizione. Nella concezione di Helmholtz questa formulazione deriva immediatamente dal principio di impossibilità del moto perpetuo interpretato come l'impossibilità "di creare continuamente forza motrice dal niente". Infatti se "la somma delle quantità di forza viva per tutte le masse puntiformi ad ogni istante nel quale i punti hanno le stesse posizioni relative l'uno rispetto all'altro o rispetto ai centri fissi delle forze" non fossero le stesse "indipendentemente dai cammini seguiti e dai cambiamenti di velocità nel moto" allora la differenza di forza viva significherebbe una differenza di lavoro, in contrasto con l'impossibilità del moto perpetuo.

E' da sottolineare che Helmholtz specifica chiaramente il proprio modello concettuale di forza: è la forza newtoniana dipendente solo dalla distanza. Pertanto il teorema di conservazione delle forze vive si può esprimere nella forma:

$$1/2 m d(v^2) = - \mathbf{j} dr$$

Helmholtz integra la precedente espressione e ottiene:

$$1/2 (mv^2)_2 - 1/2 (mv^2)_1 = \int \mathbf{Q} \mathbf{j} dr$$

formalmente analoga al teorema delle forze vive. L'interpretazione concettuale è però completamente diversa.

Helmholtz usa una nuova espressione per il secondo membro: la somma delle forze di tensione. Non c'è nessun riferimento al termine lavoro ma piuttosto al concetto leibniziano di *vis mortua*: in contrasto alle forze vive dei corpi in moto le forze di tensione sono quelle che tendono a porre un corpo in moto, ma non hanno ancora prodotto un moto effettivo. C'è pertanto un'equivalenza formale con i risultati precedenti ma una grande differenza concettuale. Helmholtz è consapevole di aver espresso un principio di validità generale e non solo un teorema della meccanica. Il concetto di conservazione dell'energia nel significato leibniziano di "nihil fieri ad nihilum" trova finalmente un'espressione concettuale ed analitica precisa: la variazione di forza viva è uguagliata alla variazione di forza morta, cioè alla somma delle forze di tensione, cioè (in termini moderni) alla variazione di energia potenziale. E' pertanto chiaro ad Helmholtz che la somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale è una costante del moto:

"In tutti i casi di moto di punti materiali liberi sotto l'influenza delle loro mutue

attrazioni e repulsioni, le cui intensità dipendono solo dalla distanza, la perdita nella forza di tensione totale è sempre uguale al guadagno di forza viva, ed il guadagno della prima è uguale alla perdita della seconda. Pertanto la somma delle forze di tensione e delle forze vive esistenti è sempre una costante. In questa forma generale possiamo definire la nostra legge come il principio di conservazione della forza".

Il grande valore del recupero della metafisica leibniziana è dato dal valore euristico oramai attribuito al principio, di cui il teorema delle forze vive era completamente privo. Il PCE oramai raggiunto, pur nella limitazione del concetto di forza al modello newtoniano, permette infatti interessanti applicazioni. In particolare citiamo qui una delle prime espressioni della teoria meccanica del calore:

"Ciò che finora è stato chiamato quantità di calore, può essere ora usato come un'espressione primo della *vis viva* del movimento termico e secondo della quantità delle forze elastiche degli atomi i cui cambiamenti di posizione costituiscono questo movimento. La prima parte corrisponderà a ciò che finora è stato chiamato calore libero e la seconda calore latente".

L'interpretazione fisica della variazione di energia potenziale come dovuta a forze newtoniane e della variazione di *vis viva* come dovuta a movimenti effettivi delle particelle è un notevole strumento euristico per stabilire equazioni utili in casi specifici. Helmholtz applica il suo PCE ad esempio allo sviluppo di calore durante i processi chimici, alle forze elettriche di contatto ed in generale ai fenomeni elettrostatici ed elettromagnetici.

Non sempre i suoi risultati sono corretti, ma si può senz'altro affermare che il suo lavoro del 1847 sarà in pochi anni riconosciuto come fondamentale nello sviluppo della fisica dell'800.

Helmholtz, a differenza di Mayer che non assumeva una concezione fisica particolare ma solo una relazione generale di equivalenza basata sul concetto di lavoro, è il vero esponente della concezione meccanicista ottocentesca. La distinzione dell'energia in cinetica e potenziale è infatti un tipico risultato di questa concezione. Come vedremo questa concezione non sarà l'unica, ma ad Helmholtz va sicuramente il merito di aver unificato varie tradizioni differenti (la conservazione della forza viva di Huygens, l'equivalenza di causa ed effetto di Leibniz, il modello di forza newtoniano, l'equivalenza di calore e lavoro) e di aver fornito un risultato generalizzabile all'intero campo della nostra esperienza.

Nonostante però il suo ruolo egli non è il punto di arrivo della nostra storia. Proprio nel periodo di massimo successo della concezione meccanica veniva affermandosi un'altra disciplina di estrema importanza: l'elettromagnetismo.

Cap. 3 Conservazione globale e conservazione locale

MODELLI ELETTROMAGNETICI

Nella seconda metà del secolo scorso il dibattito sui fenomeni elettromagnetici era molto vitale. C'erano molte scuole che si contrapponevano nelle principali nazioni europee. Qui prendiamo in considerazione il dibattito a partire dal 1846, cioè dalla pubblicazione della legge di Weber sulla interazione tra cariche. Fondamentalmente due punti di vista si contrapponevano: l'azione a contatto e quella a distanza, il campo e la particella, la concezione

della natura come continua e come discreta. Entrambi questi punti di vista avevano radici nella concezione meccanica, il primo si rifaceva alla meccanica dei corpi continui ed il secondo a quella delle particelle. Alla fine del secolo non si poteva dire che l'una o l'altra concezione avessero prevalso: la teoria di Lorentz rappresenta una sintesi, che adotta elementi di entrambi gli approcci. La risoluzione del dibattito fu ovviamente temporanea: tentativi sono ancora fatti per costruire una teoria elettromagnetica basata solamente sull'uno o sull'altro dei due modelli fondamentali.

Il concetto di energia e la sua conservazione ebbero delle importanti e nuove interpretazioni in questo dibattito, ma per comprendere i nuovi sviluppi è necessario chiarire i modelli in gioco. Il miglior tentativo in questa direzione fu fatto da Hertz nel 1892. Egli distinse tre punti di vista.

Il primo può essere attribuito alla scuola tedesca di Weber, ovvero all'azione a distanza con velocità infinita

Esponenti principali di questa scuola furono: F. Neumann (1798-1895), W. Weber (1804-1891), R. Kohlrausch (1809-1858), G. Kirchhoff (1824-1887).

W. Weber, allievo di Gauss a Gottinga e di Fechner a Lipsia, fu il primo ad adottare una concezione atomista dell'elettricità e della corrente elettrica, come moto di cariche di segno opposto. Fondamentale la sua formula del 1846, che modifica il modello newtoniano introducendo forze dipendenti dalla velocità e dall'accelerazione.

$$F = (q_1 q_2 / r^2) \{ 1 - [(1/c_w^2) (dr/dt)^2] + [(2r/c_w^2) (d^2 r/dt^2)] \}$$

Questa legge, più elementare di quella di Ampère, può spiegare la mancanza di effetti elettrostatici in una corrente di densità uniforme, è riducibile a quella di Coulomb nel caso elettrostatico e spiega non solo le forze tra correnti di Ampère ma anche i fenomeni di induzione di Faraday. Ancora nel 1886 uno storico della fisica, Hoppe, la riteneva l'unica formulazione valida dell'elettromagnetismo.

Fig. 15-16-17-18 La schematizzazione di Hertz

La prima figura (fig. 15) di Hertz illustra questo caso: delle cariche elettriche presenti sulle armature del condensatore danno origine a delle forze tra le piastre. Si suppone che l'azione si propaghi direttamente a distanza e pertanto un'eventuale asportazione di materia dalla zona "B" tratteggiata in figura non modifica l'intensità delle forze.

Il secondo punto di vista è particolarmente interessante perché è quello sostenuto da Helmholtz, che a partire dal 1870 dedicò notevoli energie ai problemi elettromagnetici. Si assumono sempre forze a distanza tra le piastre del condensatore, ma si assume la presenza di un dielettrico, più in generale di un etere materiale nello spazio, con cui le forze interagiscono. Per effetto di questa interazione il dielettrico si polarizza, cioè si ha una separazione di cariche che a loro volta sono sorgenti di forze a distanza. L'effetto combinato di queste forze dà luogo ad onde di polarizzazione con cui le forze a distanza si propagano con velocità finita. Hertz

distingue due sottocasi: se l'energia è prevalentemente attribuita alle cariche sulle piastre del condensatore un'eventuale sottrazione di materia dalla zona "B" non avrà una particolare influenza sulle forze tra le piastre (fig.16), ma se l'energia è prevalentemente attribuita alle polarizzazioni, allora evidentemente tale sottrazione diminuirà l'effetto delle forze (fig. 17).

Il terzo punto di vista è quello dell'azione per contatto: sono prioritarie le polarizzazioni e non le cariche sulle piastre, tutta l'energia è nello spazio tra le piastre (fig.18). E' notevole che sebbene fisicamente molto differenti i casi delle figure 17 e 18 sono matematicamente equivalenti.

Tale equivalenza non è assolutamente casuale ma dipende dal modo stesso in cui Maxwell ha sviluppato la sua opera: partendo dai risultati della scuola tedesca dell'azione a distanza e cercando di tradurli nella metafisica di Faraday dell'azione a contatto, utilizzando la versione differenziale più che quella integrale della teoria matematica del potenziale - e tentando sempre di mantenere una sorta di "principio di corrispondenza" con la meccanica .

Ciò risulta molto chiaramente dallo stesso "Piano dell'opera" che Maxwell pone al paragrafo 59 del suo famoso *Trattato* del 1873. "Nel seguente trattato mi propongo dapprima di spiegare l'ordinaria teoria dell'azione elettrica, che la considera come dipendente solo dai corpi elettrizzati e dalle loro posizioni relative, senza tener conto di alcun fenomeno che possa intervenire nel mezzo interposto. In questo modo stabiliremo la legge dell'inverso del quadrato, la teoria del potenziale e le equazioni di Laplace e Poisson". Più oltre: "Nel teorema di Thomson, l'energia totale del sistema viene espressa nella forma di un integrale di una certa quantità estesa su tutto lo spazio tra i corpi elettrizzati, ed anche nella forma di un integrale esteso solo sulle superfici elettrizzate. L'uguaglianza di queste due espressioni può dunque essere interpretata fisicamente. Possiamo concepire la relazione fisica tra corpi elettrizzati, sia come risultato dello stato del mezzo interposto, sia come risultato dell'azione diretta a distanza tra i corpi elettrizzati".

"Se calcoliamo su questa ipotesi l'energia totale che risiede nel mezzo, la troveremo uguale all'energia dovuta all'elettrizzazione dei conduttori nell'ipotesi dell'azione diretta a distanza. Pertanto le due ipotesi sono matematicamente equivalenti".

Par. 60) "La polarizzazione elettrica di una porzione elementare di un dielettrico è uno stato forzato in cui il mezzo è posto dall'azione della forza elettromotrice, e che scompare quando questa forza è rimossa. Possiamo concepirlo come consistente in quello che possiamo chiamare uno spostamento elettrico, prodotto dall'intensità elettromotrice".

"L'analogia tra l'azione dell'intensità elettromotrice nel produrre lo spostamento elettrico e della forza meccanica ordinaria nel produrre lo spostamento di un corpo elastico è così ovvia che mi sono avventurato a chiamare il rapporto dell'intensità elettromotrice rispetto al corrispondente spostamento elettrico, il coefficiente di elasticità elettrica del mezzo".

Par. 62) "Dato che, come abbiamo visto, la teoria dell'azione diretta a distanza è matematicamente equivalente a quella dell'azione tramite un mezzo, gli effettivi fenomeni possono essere spiegati da una teoria come dall'altra, ammesso che opportune ipotesi vengano introdotte quando capitino delle difficoltà".

L'equivalenza formale tra le figure 17 e 18 si spiega anche con il fatto che la teoria di Helmholtz dell'azione a distanza ritardata dalla presenza del dielettrico presentata nel 1870 con l'esplicito scopo di "mettere ordine nel campo dell'elettromagnetismo" era una teoria che comprendeva come casi particolari quella di Weber, di Neumann e di Maxwell.

Sappiamo che Helmholtz partì da posizioni rigidamente newtoniane e perciò si oppose strenuamente per tutta la vita a Weber che aveva modificato il modello newtoniano delle forze. Helmholtz finì poi, pur di non accettare la teoria di Weber, per modificare gradatamente il

proprio punto di vista fino a preferire la teoria di Maxwell, anche se non nella stessa interpretazione di Maxwell. Vedremo che i motivi di questa scelta sono legati al concetto di energia. La teoria di Helmholtz sarà vista anche in seguito (a fine secolo da Duhem) come l'unica teoria elettromagnetica coerente e stimolerà sia gli esperimenti di Hertz sia le prime ricerche di Lorentz.

In definitiva Helmholtz rappresentò un punto cruciale nello sviluppo dell'elettromagnetismo classico, maggiore probabilmente di quello stesso di Maxwell.

Come vedremo, l'accettazione della teoria di Maxwell fu decretata da Helmholtz e, nella sintesi di Lorentz, Maxwell rappresenta solo una delle componenti, e notevolmente modificata rispetto all'originale.

La posizione dello stesso Hertz relativa al modello concettuale è abbastanza chiara: è una rigorosa affermazione della priorità delle polarizzazioni; va aggiunto inoltre che egli a) eliminò dalle equazioni originarie di Maxwell i termini contenenti i potenziali, b) considerava l'etere come totalmente trascinato dai corpi in moto: in tal modo non scisse il campo elettromagnetico dalla materia. Non dobbiamo dimenticare che per Maxwell l'etere è una sostanza materiale ed il campo elettromagnetico è uno stato meccanico dei mezzi dielettrici, uno dei quali è l'etere.

"Sebbene libri divulgativi sulla storia della fisica spesso asseriscano che la scoperta di Hertz delle onde elettromagnetiche nel 1888 verificò la teoria del campo elettromagnetico, ciò che comunemente si riteneva provato all'epoca era l'esistenza dell'etere come sostanza meccanica". Infatti Maxwell e la sua scuola considerarono il campo elettromagnetico come uno stato speciale della materia, un "accidente" delle sostanze dielettriche e non una "sostanza" in se stesso. Lo "spostamento elettrico" è un vero spostamento di particelle del dielettrico, sia esso etere o altro, e quindi l'etere e la materia non differiscono. Maxwell non indagò la natura della carica elettrica, e quindi si precluse la possibilità di distinguere l'etere dalla materia e quindi di rendere autonomo il campo elettromagnetico e di completare così la sua teoria dell'azione a contatto, che invece pur sempre si basava sull'azione a distanza che provocava la polarizzazione. Indagare la natura dell'elettricità avrebbe anche significato indagare la struttura microscopica della materia e quindi gli spazi intermolecolari riempiti dall'etere e quindi separare etere e materia, campo elettrico e materia

Hertz col postulare le equazioni di campo demolì l'immagine meccanica del campo. Non ci sono più problemi concernenti la costituzione dell'etere, anche se, essendo l'etere inseparabile dai corpi, non c'è ancora la separazione tra etere e materia: sia per l'ipotesi dell'etere completamente trascinato sia per la mancanza di un punto di vista atomistico.

H. A. Lorentz (1853-1928) diede una sintesi di queste varie scuole in contrapposizione. La sua opera fu veramente eccezionale e rappresentò sia la vetta dell'elettromagnetismo classico che il punto di partenza per ricerche sulla teoria della relatività, per lo sviluppo della meccanica quantistica, nonché per la cosiddetta concezione elettromagnetica della natura (1900-1910). In particolare in cinque lavori Lorentz presenta le sue scoperte.

1875: L'articolo viene scritto sotto l'influenza dei lavori di Helmholtz e quindi dell'azione a distanza con velocità finita; la luce viene considerata come propagazione in un mezzo materiale di variazioni dello stato di polarizzazione; la vibrazione elettrica viene attribuita al fatto che la polarizzazione dielettrica è una funzione periodica del tempo.

1878: Viene mantenuta una concezione dell'azione a distanza, ma l'etere viene visto come il solo dielettrico, anche se ancora come corpo materiale. Il ruolo dell'etere viene però distinto da quello delle particelle che costituiscono la materia ponderabile. Il significato del

lavoro sta nel fatto che il modello fondamentale della teoria dell'elettrone veniva così stabilito: un oscillatore armonico entro una molecola, e si avviava l'idea che l'etere intermolecolare avesse proprietà analoghe al vuoto. Qui c'è il passo decisivo per rendere il campo indipendente dalla materia: l'immagine di un etere onnipervasivo (vuoto) e di un sistema di particelle cariche. Si doveva solo accettare l'idea dell'azione a contatto.

1891: Qui si accetta per la prima volta la teoria di Maxwell sulla base di considerazioni energetiche oltre che delle influenze di Hertz e Poincaré.

1892: Il campo elettromagnetico è considerato come uno stato dinamico dell'etere stazionario privato di tutte le qualità meccaniche. Il campo è un'entità fisica indipendente.

1895: Si rinuncia a una derivazione meccanica delle equazioni di campo.

Nel 1895 il dibattito poteva dirsi grosso modo concluso, almeno provvisoriamente. Questi brevi richiami hanno voluto semplicemente introdurre ai modelli in gioco, dare almeno un quadro schematico di riferimento, più che dare risposte a complessi problemi storici. Una indicazione però emerge con una certa chiarezza: un ruolo notevole fu giocato dal principio di conservazione dell'energia. Questo stesso principio però ebbe varie formulazioni e l'intergioco tra formulazioni del principio e modelli delle varie scuole è un campo di indagine estremamente importante.

Richiamiamo dunque i principali modelli in gioco per quel che riguarda le forze: le forze newtoniane agenti istantaneamente e dipendenti solo dalla distanza; le forze di Weber (e di Clausius) che dipendono anche dalla velocità e dall'accelerazione: è importante notare che queste forze, al pari di quelle newtoniane, ammettono un potenziale; le azioni a distanza in presenza di un dielettrico di Helmholtz; le azioni a contatto di Faraday e Maxwell. Infine con la sintesi di Lorentz le azioni a contatto si propagheranno in uno spazio vuoto: più che sul "contatto" il modello fisico si baserà sulla contiguità della propagazione.

Le esperienze di elettromagnetismo (Hertz) portavano ad una conclusione fondamentale: le interazioni non si propagano istantaneamente ma con velocità finita. Le forze newtoniane non erano applicabili. Ma l'espressione fondamentale meccanicista della conservazione dell'energia era connessa con questo modello delle forze. Come si doveva dunque esprimere l'energia elettromagnetica?

Weber e Clausius adottarono un punto di vista formale: è sufficiente che le forze ammettano un potenziale. Il potenziale delle loro forze non era però una funzione della sola posizione ma anche delle velocità (le forze dipendono anche dall'accelerazione). Si perdeva quindi la distinzione tra energia cinetica e potenziale: il potenziale aveva anche una parte cinetica; nel caso di Weber:

$$V=(ee'/r) [(1/cc) (dr^2/dt^2)-1]$$

Notiamo che questo è in sostanza uno sviluppo della linea di Huygens del teorema di conservazione delle forze vive: il lavoro è un differenziale esatto, cioè non dipende dalla traiettoria ma solo dalle posizioni iniziale e finale, non c'è una concezione fisica dell'energia e non c'è un principio, ma solo un teorema; manca dunque quella famosa relazione di causa/effetto tra i due termini dell'equazione.

Nel caso della teoria di Maxwell che ancora prevedeva un etere materiale, e analogamente nella teoria di Helmholtz, si poteva invece ancora utilizzare la distinzione tra energia cinetica e potenziale, purché interpretate come stati dell'etere, in analogia alla teoria dell'elasticità. Questo era il motivo della preferenza di Helmholtz per la teoria di Maxwell. Quando però Lorentz affermò l'idea di etere non materiale anche questa concezione andò in

crisi e fu necessario un nuovo concetto di energia e della sua conservazione. Tale concetto era già stato suggerito da Poynting nel 1884 e affermato da Planck nel 1887. Va sotto il nome di conservazione locale dell'energia.

LA CONSERVAZIONE LOCALE DELL'ENERGIA

Con Poynting tutte le ambiguità presenti in Maxwell vengono superate. Le correnti non sono più viste come le sorgenti di una energia che è istantaneamente creata intorno a loro, ma come posizioni dove avvengono trasformazioni di energia sia come risultato di una "convergenza" di energia dallo spazio esterno che come una "divergenza" verso di esso (1884). Ma sia la convergenza che la divergenza richiedono tempo. Come risultato l'energia del "campo", cioè della porzione di spazio riempita di materia, non è più divisibile in cinetica e potenziale, perché l'azione a distanza è completamente superata da un'azione a contatto con un tempo di propagazione finito. L'energia elettromagnetica richiede un tempo di propagazione e acquista un significato autonomo, indipendente dal meccanismo dell'etere materiale e prioritario rispetto a questo. L'idea di energia di Maxwell, nonostante la localizzazione nel mezzo circostante, ancora riflette la proprietà attribuita alle sorgenti, cariche e correnti, come "produttori" di questa energia.

Poynting nel lavoro del 1884 afferma esplicitamente di non aver affrontato le proprie ricerche sulla base di sollecitazioni sperimentali e di non poter offrire immediate nuove predizioni, ma di essere invece partito dai problemi lasciati aperti da Maxwell:

"...siamo in maniera naturale portati a considerare il problema: come fa l'energia intorno ad una corrente a passare da punto a punto, cioè per che cammini e in accordo a quali leggi essa viaggia dalla parte del circuito dove è dapprima riconoscibile come elettrica e magnetica a quelle parti dove essa è cambiata in calore o in altre forme?".

Poynting parte dai valori dell'energia cinetica e potenziale del mezzo dati da Maxwell e deriva la sua famosa espressione della conservazione locale ove la distinzione cinetico-potenziale è persa. Se consideriamo un volume racchiuso da una superficie chiusa, la variazione di energia del volume passerà attraverso la superficie di separazione:

"Se la superficie viene presa dove la materia non ha velocità...l'ammontare di energia per secondo che attraversa l'area unitaria perpendicolare al flusso è:

intensità elettromotrice x intens. magnetica x seno ang.. incl..

p4 ~

Dato che la superficie può essere disegnata ovunque vogliamo allora dovunque c'è sia intensità elettromotrice che magnetica c'è flusso di energia".

Tra le conseguenze importanti dell'opera di Poynting c'è il superamento del concetto di corrente di spostamento (dovuto al generale "declassamento" dell'idea di corrente) e una differente localizzazione dell'energia; nella scarica di un condensatore attraverso un conduttore che colleghi le armature l'energia non è più trasformata dalle correnti di spostamento e conduzione come in Maxwell, ma fluisce all'esterno del dielettrico lungo superfici equipotenziali fino a convergere sul conduttore ed essere dissipata come calore di Joule. Poynting ottenne un magnifico miglioramento delle teorie di Maxwell, spostando definitivamente la priorità dalle cariche e correnti alle intensità elettriche e magnetiche. Attribui fondamentale importanza al flusso di energia e trovò che questo flusso è proporzionale ad

$E \cdot b$. In questo senso pose l'attenzione sul mezzo e sulla conservazione locale dell'energia, raggiungendo un nuovo fondamentale significato di conservazione, cioè una conservazione connessa con la propagazione temporale. Nello stesso tempo attribuì importanza all'idea di azione a contatto (cioè a piccolissima distanza) più che all'idea di un etere meccanico.

L'idea di conservazione locale, suggerita da Maxwell e completata da Poynting, sarà alla base dell'accettazione della teoria britannica nel continente europeo, prima ed indipendentemente delle esperienze di Hertz ed indipendentemente da queste.

Val la pena a tal proposito riportare una lunga citazione di Planck del 1887, anteriore anche essa alle esperienze di Hertz, per mostrare i motivi teorici che spinsero i fisici degli anni '90 ad abbandonare la conservazione globale in favore di quella locale e di conseguenza ad abbracciare la propagazione contigua suggerita da Maxwell.

La teoria di Ampère-Neumann sugli effetti mutui di corrente chiuse e magneti si presenta come un sistema completo, strettamente connesso al PCE, che forma la base per ulteriori ricerche confermate dai risultati di numerosi esperimenti. Viene lasciato al gusto personale la volontà di pensare se gli effetti dei singoli elementi di corrente avvengano secondo la legge elementare di Ampère o quella di Grassmann oppure anche secondo la legge del potenziale di Helmholtz.

Questa teoria mostra allora un difetto soltanto se si lascia cadere un'ipotesi fatta all'inizio cioè quella che la velocità delle variazioni del campo elettromagnetico risulti trascurabile rispetto alla velocità critica. In questo caso si evidenziano certi fenomeni che si devono interpretare come manifestazioni del fatto che gli effetti e.m. richiedono tempo per la loro propagazione.

E sintomatico il fatto che finora tutte le teorie stabilite sull'essenza dell'elettricità, per quanto si distinguano per origine e per corso di idee - anche quelle che derivano dall'ipotesi di una azione diretta a distanza - sono arrivate nel loro successivo sviluppo a questo unico e stesso punto. Già Gauss considerava la derivazione delle forze, prodotte dal moto delle cariche elettriche, da un effetto che si trasmetteva non istantaneamente ma con velocità finita, come la "chiave di volta" dell'elettrodinamica e attribuiva il fallimento dei suoi sforzi diretti a ciò proprio al fatto che egli riteneva la legge elettrica fondamentale, che aveva stabilito, non ancora matura per il pubblico. B. Riemann perseguiva simili idee e C. Neumann riuscì in modo eccellente a ricondurre la legge fondamentale di Weber all'ipotesi che il solito potenziale elettrostatico si propaga uniformemente da ogni parte con una determinata velocità e che questa propagazione è l'unico motivo per il quale le forze elettriche sembrano dipendere anche dalle velocità ed accelerazioni delle particelle elettriche agenti.

Ci si chiede però se una tale interpretazione sia generalmente compatibile con l'ipotesi di un'azione diretta a distanza o se non sia direttamente necessaria l'ipotesi di una velocità di propagazione finita degli effetti elettrici, per assumere con Faraday, Maxwell e molti altri fisici una variazione del mezzo intermedio che accompagna e fa da intermediario alla propagazione. Allora lo stato di un sistema elettrico non può dipendere esplicitamente dal tempo ma solo da variazioni fisiche subite dalle parti materiali del sistema (comprese quelle dell'etere) nell'istante considerato. Anche la legge fondamentale di Clausius che si ricava senza considerare la presenza di un mezzo intermedio, non può evitare di riferirsi ad esso perché non è pensabile fisicamente una velocità realmente "assoluta".

Se ora viene già riconosciuto il significato sostanziale del mezzo intermedio per la realizzazione degli effetti elettromagnetici, si è vicini all'idea di abbandonare la pura azione a distanza e trasferire al mezzo intermedio la completa mediazione di quegli effetti o in altre parole, seguendo un'espressione di C. Neumann, ricondurre gli effetti "telescopici" a quelli "microscopici".

Davanti a questo problema di principio, dobbiamo, secondo il mio parere, tralasciare tutti gli altri quesiti, come per es. se si debbano distinguere due tipi diversi di cariche o no, se esistano e quando correnti non chiuse, come allora si debbano dedurre gli effetti mutui di due elementi di corrente degli effetti mutui di correnti chiuse, inoltre come allora si debbano immaginare le correnti molecolari nei magneti, infine quale sia la legge fondamentale degli effetti elettrici, etc.

Infatti, secondo la risposta al problema principale, la serie di interpretazioni e perciò il corso

della ricerca viene condotto in direzioni completamente diverse, e ciò comporta un vero e proprio sovvertimento di tutte le nostre concezioni, tramandate da Newton e divenute poi abituali, sull'essenza delle forze agenti in natura

Anche se noi, secondo il procedimento proprio di Newton, consideriamo come dato solo il fenomeno e lasciamo completamente intoccato il problema dei processi che eventualmente possono svolgersi in qualche luogo, ma che temporaneamente si sottraggono all'osservazione, la nostra attuale concezione della natura viene pervasa e dominata dalla interpretazione dell'azione diretta a distanza, nell'universo cosmico come in quello molecolare; cioè crediamo che fra le stelle, fra gli atomi non avvenga nient'altro di quello che sta in rapporto necessario e determinante con i moti di questi corpi una interpretazione che trova fondamento nel fatto che noi in effetti non riusciamo ad osservare tali processi nel moto delle stelle mentre per gli atomi ci basiamo solo su una deduzione per analogia.

E allora, se si dovesse finalmente riuscire - e ciò è attualmente molto probabile - a ricondurre la totalità dei fenomeni e.m. a forze che agiscono solo a distanze infinitesime, non si può dubitare del fatto che dovremmo abituarci a trattare dallo stesso punto di vista gli effetti della gravitazione che seguono leggi tanto più semplici e, in seguito, anche i fenomeni chimici; perché la semplificazione che la nuova concezione porta in tutte le nostre interpretazioni può essere ulteriormente perfezionata, come noi in seguito cercheremo ancora di evidenziare. In questo compito, il disagio nel rinunciare ad una associazione di idee radicate da ormai lungo tempo non potrà cambiare nulla: perché come nel corso di molti secoli la rappresentazione di un'azione diretta a distanza faticosamente ma necessariamente divenne una viva consuetudine, così si deve riuscire a sradicare questa abitudine ora che è stato veramente accertato che quella interpretazione ha già esaurito il suo compito. Senza pregiudicare questa questione fondamentale con decisioni definitive troppo avventate, a conclusione delle nostre ricerche vogliamo evidenziare anche risultati essenziali per l'impiego del PCE che derivano dalla applicazione generale della nuova teoria. In mancanza di un nome breve calzante per questa teoria in seguito mi permetterà di indicarla come "teoria infinitesima".

Anzitutto è importante sottolineare che le due opposte teorie non possono essere in alcun modo considerate equivalenti ma che la teoria dell'azione a distanza si dimostra come la più generale, così come una grandezza finita ne contiene in sé una infinitesima come caso particolare. Secondo la teoria infinitesima, le forze che agiscono sulle parti di un corpo dipendono solo dal suo stato, secondo l'altra teoria invece anche da tutti i corpi che riempiono l'intero universo; questa circostanza costituisce anche il motivo per il quale, nella nostra precedente descrizione e formulazione, ci siamo soffermati maggiormente sulla interpretazione generale dell'azione a distanza. Se la teoria infinitesima viene confermata, allora contemporaneamente viene dimostrata una nuova legge generale della natura, cioè la legge che tutte le variazioni che avvengono dentro e sopra un elemento materiale sono completamente determinate dai processi istantanei all'interno e sul confine dell'elemento. Si capisce che questa affermazione penetra profondamente nell'essenza e nel modo di azione di tutte le forze naturali.

Perciò ora anche il concetto di energia ottiene un significato molto più semplice, dato che si collega ancora più strettamente il comportamento dell'energia a quello della materia. La quantità di materia nel mondo non può essere aumentata né diminuita, ma, cosa più significativa, neanche la materia può sparire da un luogo per riapparire contemporaneamente in un altro a distanza finita, piuttosto essa può cambiare posto continuamente nel tempo. La quantità di materia che si trova in uno spazio chiuso può cambiare solo mediante l'entrata o l'uscita di materia attraverso le superfici limite dello spazio e la misura della variazione è fornita proprio dal *quantum* che passa attraverso la superficie.

Con l'energia le cose stanno diversamente finché viene mantenuta la teoria dell'azione a distanza. La totalità dell'energia resta invariata in natura, però l'energia può passare improvvisamente da un corpo ad un altro a distanza finita, un pianeta può trasferire direttamente la sua forza viva ad un altro, un magnete con l'energia del suo moto produce istantaneamente calore in un circuito di corrente indotta etc.. Secondo la teoria infinitesima, invece, l'energia come la materia può solo cambiare posto continuamente nel tempo. L'energia che si trova in uno spazio chiuso può essere aumentata o diminuita solo attraverso quegli effetti esterni che sono mediati da processi fisici sulle superfici limite dello spazio; quindi si può parlare anche qui di un passaggio di energia attraverso questa superficie. Allora l'energia di un sistema materiale può essere sempre decomposta in elementi, ciascuno dei quali spetta ad un unico elemento materiale determinato ed è localizzato in

esso (mentre per esempio l'energia potenziale di due corpi agenti l'uno sull'altro a distanza compare sempre e solo come un tutto indivisibile). Perciò se diversi sistemi materiali sono raggruppati in uno solo, allora l'energia del sistema totale è uguale alla somma delle energie dei singoli sistemi - un'affermazione che è peculiare della teoria infinitesima.

In questa grandiosa semplificazione della concezione della natura, formata dalla teoria infinitesima si richiede sempre più urgentemente alla ricerca fisica la dimostrazione approfondita della validità di questa teoria, scoprendo fin nei dettagli le sue conseguenze; perché solo così si raggiunge il mezzo per confermarla o per confutarla.

Anzitutto è chiaramente della massima importanza separare completamente l'essenza di questa teoria da tutte le ipotesi sulle quali la concezione si sostiene e che però non hanno nulla a che fare con la teoria in sé e per sé.

Le difficoltà che possono sorgere nella nostra immaginazione non vengono considerate; per es. il fatto che l'etere non si comporti come uno dei corpi solidi, fluidi o gassosi conosciuti, è una circostanza che non procura la minima difficoltà alla teoria infinitesima.

Potremo col tempo abituarci al modo specifico di agire dell'etere così come alle proprietà che qualsiasi altro corpo mostra e che presto verranno incluse nella serie dei fenomeni familiari alla nostra molteplice esperienza.

Tuttavia non si può negare il fatto che, attraverso l'assunzione di una sostanza particolare tanto diversa da tutte quelle conosciute, non si favorisce quella descrizione della natura, la più semplice possibile, alla quale aspiriamo; proprio la semplificazione procurata in tutto il regno dalla natura dalla regolare applicazione della teoria infinitesima deve essere valutata infinitamente più elevata dello svantaggio che deriva dall'introduzione di una nuova sostanza, la quale d'altronde è indispensabile nelle teorie della luce e già ivi assume una posizione del tutto eccezionale nella serie dei corpi solidi per il suo altro grado di elasticità e la sua minima densità. In ogni caso la decisione definitiva su questo problema deve essere indicata come una delle conquiste più preziose che si prospettano nella ricerca scientifica per i prossimi tempi.

Infine vorrei qui far presente ancora una notevole analogia. Si credeva una volta che tutti gli eventi in natura, sia immateriali che fisici, trovassero fondamento ed adeguata spiegazione non solo nei fatti che avvengono istantaneamente bensì che in generale sia il passato che il futuro (teleologia), contribuendo direttamente, intervenissero nel corso delle cose e così influissero sulla legge di causalità. La moderna scienza naturale - e su questo si basa proprio il considerevole vantaggio che essa ha rispetto agli antichi - ha distrutto questa credenza, e suppone che in definitiva lo stato presente, ossia ciò che avviene proprio istantaneamente in tutto il mondo, formi la causa sostanzialmente determinante di ciò che avverrà il momento prossimo, dunque che nella ininterrotta catena di variazioni ogni termine sia condizionato indipendentemente e in tutta la sua estensione da ciò che direttamente lo precede.

In altre parole: riguardo agli effetti temporali la teoria infinitesima ha raggiunto il riconoscimento radicale. Dovrebbe essere riservato ai prossimi decenni, realizzare la stessa cosa per gli effetti spaziali, mostrando che non esiste un influsso diretto a distanza spaziale né a distanza temporale bensì che tutti gli effetti spaziali come quelli temporali appaiono in ultima linea composti da effetti che si propagano da elemento a elemento. In questo caso ogni fenomeno trova la sua completa spiegazione nei fatti direttamente adiacenti nello spazio e nel tempo e tutti i processi finiti si compongono di effetti infinitesimi.

Questo secondo passo mi sembra che segua il primo in modo del tutto analogo, e prevalentemente ad esso dobbiamo attribuire i risultati della scienza naturale odierna; siamo autorizzati ad aspettarci che esso si potrà dimostrare di importanza ugualmente eccezionale anche per il suo sviluppo successivo. (*Il principio di conservazione dell'energia*)

In definitiva secondo Planck la conservazione locale è da preferire perché, tra l'altro, avvicina il concetto di energia a quello di materia.

Planck ribadirà queste parole anche molto più tardi, nel suo libro di testo degli anni venti.

Ma la citazione del 1887 è importante perché anticipa un notevole sviluppo del concetto di energia, cioè la sua equivalenza con quello di massa.