

CAPITOLO II

Formulazione e dimostrazione del principio

Ogni definizione fisica, che abbia la pretesa di essere utilizzabile, deve alla fine ricondurre il concetto da definire a concetti che scaturiscano dalla percezione immediata attraverso i sensi, così che occorra solo un'osservazione diretta per esprimere la grandezza in questione con valori numerici più o meno esatti. Dato che prendiamo conoscenza dei fenomeni della natura attraverso i sensi più eterogenei, non ci sarebbe qui utile collocarsi a priori nel punto di vista della concezione meccanica della natura, trattandosi per ora della formulazione di una definizione generale del concetto di energia; infatti la misura meccanica con la quale possiamo valutare qualsiasi fenomeno non ci è data direttamente, ma al contrario deve di norma essere prima cercata. Sarà perciò in primo luogo nostro scopo fondare la definizione dell'energia, indipendentemente da ogni particolare concezione della natura, puramente su fatti misurabili.

Partendo da questo punto di vista possiamo procedere in due modi. Possiamo infatti definire l'energia di un sistema materiale come una funzione il cui valore dipenda in modo determinato dalle variabili che stabiliscono lo stato del sistema, vale a dire la posizione, velocità, temperatura etc. degli elementi materiali del sistema. Questa definizione presuppone però già la validità generale del principio della conservazione dell'energia; infatti per sapere se una tale funzione dopo tutto esiste e come P. è composta da quelle singole grandezze, bisogna conoscere già il principio ed applicarlo. Diamo perciò dapprima la preferenza ad una definizione, dovuta principalmente a W. Thomson (pag.64), che consente di calcolare il valore dell'energia di un sistema materiale, senza alcun riguardo alla validità o meno del principio, unicamente per mezzo degli effetti esterni accessibili all'osservazione, che sono causati da una certa variazione dello stato del sistema. Di conseguenza chiamiamo energia (capacità di compiere lavoro) di un sistema materiale in uno stato determinato, l'ammontare, espresso in unità di lavoro meccanico, di tutti gli effetti che vengono suscitati^(v77) al di fuori del sistema allorchè esso passa, in modo qualsiasi, dal suo stato ad uno stato zero arbitrariamente scelto.

Innanzitutto, alcune espressioni contenute nel testo di questa proposizione richiedono un particolare chiarimento. Per “effetti suscitati al di fuori del sistema” o, più in breve, “effetti esterni”, vogliamo intendere le modificazioni sopravvenute in natura al termine del processo, che dipendono dalla posizione e dalla natura dei corpi circostanti (non inclusi nel sistema)^(v78) tra le quali, p.es., anche la variazione della posizione del sistema in relazione all'ambiente, poichè essa dipende (oltre che dalla posizione del sistema stesso)^(v79) dalla posizione dei corpi circostanti. Per ottenere gli effetti esterni nella loro completezza, è meglio supporre dapprima il sistema del tutto isolato in uno spazio infinito, e solo successivamente introdurre nelle vicinanze quei corpi la cui azione è idonea a provocare la transizione richiesta. Se, p.es., il sistema si muove sotto l'azione della gravità, allora fa parte degli effetti esterni anche la variazione della posizione del sistema relativamente alla terra; l'ammontare di questi effetti, misurato in unità di lavoro, è il lavoro compiuto dalla forza di gravità durante il movimento, che costituisce dunque la misura dell'energia del sistema (in questo caso la sua forza viva più una costante additiva)^(v80). (Qualcosa di più preciso a questo proposito, in seguito). Altro è naturalmente se si include la terra nel sistema materiale considerato; allora scompaiono del tutto gli effetti esterni^(v81).

Per quanto riguarda inoltre l'espressione “l'ammontare calcolato in unità di lavoro meccanico” (in breve valore di lavoro, equivalente meccanico) degli effetti esterni, usata nella definizione, essa ha naturalmente un significato preciso solo in base al presupposto che, o gli effetti esterni siano di per sé solo di natura meccanica, cioè consistano nella produzione o nel consumo di forza viva o lavoro (in senso stretto)^(v82) oppure, nel caso siano di altra specie, che allora il loro equivalente meccanico sia già altrimenti conosciuto. Se questo presupposto non dovesse essere soddisfatto, p.es.

ammettiamo che gli effetti esterni consistano nella produzione di una qualsiasi particolare variazione, magari di un certo agente il cui valore di lavoro non è conosciuto, la definizione ovviamente perderebbe significato e si dovrebbe far in modo da eliminare in qualche maniera l'agente neo-generato, magari consumandolo per effettuare lavoro meccanico o per la produzione di effetti tali da essere riconducibili alla misura meccanica del lavoro. Se questo tentativo riesce, allora si possono finalmente esprimere tutti gli effetti esterni in equivalenti di lavoro e raggiungere così lo scopo; allora l'equivalente meccanico di un effetto è rappresentato da quella quantità di lavoro in cui questo effetto si può trasformare. (A questo punto rimane ancora da chiarire se la quantità di lavoro è diversa quando la trasformazione viene effettuata in modo diverso)^(v83). Ma si può anche bene immaginare il caso in cui sia del tutto impossibile trasformare interamente in effetti meccanici il nuovo agente, e in tal caso viene meno la spiegazione data del concetto di valore del lavoro e quindi la definizione dell'energia.

Supponiamo p.es. che l'equivalente meccanico del calore non sia ancora conosciuto e che si debba calcolare l'energia di un certo corpo ad una certa temperatura (in condizioni normali di pressione^(v84) atmosferica) lo stato zero del corpo sia caratterizzato da una certa bassa temperatura (p.es. 0° C)^(v85). È molto facile portare il corpo allo stato zero privandolo di un certo quantum di calore (mediante asportazione di calore)^(v86) ma l'effetto esterno così prodotto, il riscaldamento dell'ambiente, non si può interamente trasformare, con nessun genere di espedienti, in lavoro meccanico; per quanti tentativi si vogliano fare a questo scopo resta sempre una determinata variazione residua che non può essere misurata direttamente in unità di lavoro. Si potrebbe p.es. convertire quel calore in lavoro attraverso la dilatazione del portatore dello stesso, ma allora si avrebbe di nuovo in questa dilatazione un certo effetto di cui non si conosce l'equivalente meccanico e che non si può ricondurre a variazioni misurabili in termini meccanici, in breve: per questa via non si giungerebbe mai ad un'espressione del valore dell'energia.

Ne consegue che, nel caso citato, la spiegazione data per il concetto del "valore di lavoro" di un effetto necessita di un'adeguata integrazione e questa integrazione può basarsi sul fatto che se un certo effetto non può essere trasformato interamente in lavoro meccanico, esso però può essere generato con la spesa di una certa quantità di lavoro. (Si veda però l'obiezione a pag. 96 e la replica alla stessa.)^(v87). Se perciò, in tutti i casi in cui la prima spiegazione non basta, indichiamo come equivalente meccanico di un effetto esterno quella quantità di lavoro che deve essere utilizzata per produrre questo effetto o, più brevemente, quella che si lascia trasformare in questo effetto (in modo qualsiasi)^(v88), allora otteniamo in ogni caso un'espressione per il valore di lavoro degli effetti esterni e quindi anche per l'energia del sistema considerato. Questo appare di fatto immediatamente nell'esempio descritto, in cui l'effetto esterno consiste nel riscaldamento di un corpo. Mentre è impossibile trasformare questo effetto interamente in lavoro, sono invece disponibili diversi metodi per produrre questo effetto con l'utilizzo di mezzi puramente meccanici, vale a dire per portare il corpo dall'originale temperatura inferiore a quella superiore, quali urto, attrito, compressione. (Nell'utilizzo dell'ultimo di essi bisogna far attenzione che il corpo si dilati di nuovo dopo la conseguita compressione, senza produzione di lavoro esterno, affinché il calore ottenuto con la compressione non venga nuovamente perduto quando il corpo viene riportato alla sua pressione originale.)^(v89) L'equivalente meccanico di un riscaldamento è quindi pari alla quantità di lavoro il cui consumo provoca il riscaldamento.

Ne consegue che, con l'utilizzo delle precisazioni indicate, la definizione dell'energia di un qualsiasi sistema materiale fornisce in tutti i casi (almeno)^(v90) un valore numerico (positivo o negativo)^(v91), in unità di misura note, che, a seconda dell'esattezza dei metodi sperimentali a disposizione, può essere stabilito con maggiore o minore precisione. È ovvio che la definizione è indipendente da ogni ipotetica

concezione che ci si può formare sulla qualità dei diversi agenti attivi nella natura, in particolare anche dalla visuale meccanica, in quanto essa si fonda unicamente sulla misura diretta di grandezze meccaniche di lavoro; inoltre essa non dipende affatto, cosa particolarmente degna di nota, dalla validità del principio di conservazione dell'energia, poichè lascia del tutto indeciso se con l'utilizzo di metodi diversi per il passaggio del sistema materiale dallo stato dato allo stato zero si pervenga a valori differenti dell'energia oppure no, ed egualmente lascia del tutto indefinito se ad ogni effetto esterno corrisponde o no un equivalente meccanico univocamente determinato.

A questo punto dobbiamo tuttavia ancora discutere in particolar modo un'obiezione che può essere contrapposta all'utilizzabilità della definizione data.

Potrebbe infatti accadere che il passaggio del sistema dallo stato dato allo stato zero (fissato ad arbitrio)^(v92) non sia per niente realizzabile. Ammettiamo, p.es., che il sistema materiale consista di una certa quantità di carbonio che nello stato dato, di cui deve essere determinata l'energia, si presenti, eventualmente come carbonio amorfo, mentre nello stato zero si presenti nella modificazione di diamante. In questo caso non è realizzabile, con nessun mezzo sperimentale il passaggio allo stato iniziale^(a4) (anche se il passaggio inverso è possibile)^(v93) e la definizione dell'energia viene meno al suo compito fin dall'inizio. Possiamo addirittura spingerci oltre. Si possono benissimo immaginare dei casi in cui il passaggio non può essere attuato in nessuna direzione, nè dallo stato dato allo stato zero nè viceversa, mentre (si tratta naturalmente di un'ipotesi)^(v94) è sempre lo stesso sistema materiale (cioè gli stessi elementi chimici)^(v95) che abbiamo davanti a noi in entrambi gli stati. Scegliamo, anche a questo proposito, un esempio preciso. Destrosio e levulosio sono due individui chimici esattamente della stessa composizione quantitativa, gli stessi atomi si possono quindi pensare combinati una volta come destrosio e una volta come levulosio. Eppure entrambi i composti non sono per ora trasformabili l'uno nell'altro; inoltre nessuno dei due si può preparare sinteticamente dai suoi elementi e perciò, allo stato presente della scienza, non si può con nessun mezzo esterno, neppure attraverso decomposizione negli elementi, portare il sistema dall'uno stato all'altro. Se si dovesse calcolare l'energia di un quantum⁽ⁿ¹¹⁾ di destrosio (a temperatura qualsiasi, etc.) riferita alla medesima quantità di levulosio come stato zero (una questione molto importante in certi casi)^(v96), la definizione di energia data non ci servirebbe a nulla; a questo esempio se ne possono aggiungere naturalmente molti altri.

Possiamo ovviare all'obiezione sollevata, in due modi diversi. Da un lato potremmo a ragione richiamarci al fatto che qui non si tratta per niente di una misurazione del valore dell'energia da eseguire effettivamente, che, d'altra parte, non può essere mai effettuata con assoluta precisione, e per la quale in seguito troveremo altri metodi ancora migliori^(v98); piuttosto si tratta di chiarire sufficientemente il significato del concetto di energia senza tener conto se la via, con la quale arriviamo al concetto, sia utile solo per la descrizione oppure anche per l'esperimento. A questo proposito dovrebbe bastare di certo la prova che il passaggio descritto dallo stato dato allo stato zero sia di norma possibile in natura, cioè che le forze della natura presenti siano in grado, operando congiuntamente in modo appropriato, di provocare il passaggio. Bisogna ora tener conto che sperimentare consiste solo nel combinare in modo più o meno arbitrario certe forze della natura, e che il campo entro il quale queste combinazioni sono possibili, è da considerarsi in ogni caso estremamente limitato, a confronto della molteplicità degli effetti che quotidianamente si svolgono senza il nostro intervento nel mondo organico e inorganico. Anche se non siamo in grado di trasformare a piacimento carbonio amorfo in diamante, niente ci impedisce di supporre, e del resto molte analogie depongono a favore di ciò, che forse attraverso un processo di cristallizzazione della durata di un millennio, il diamante possa separarsi da una soluzione di un ordinario composto del carbonio e, una volta ammesso questo, si può certamente parlare anche di determinati effetti esterni e del loro valore di lavoro. Ad ogni modo non è ancora noto nessun fatto che ci impedisca di credere che le forze

della natura siano in grado di trasformare tutte le sostanze, anche corpi organici e organizzati, in altre, purchè siano formate dagli stessi elementi chimici; non occorre spingerci più oltre.

L'importanza in linea di principio delle proposizioni qui esposte esige tuttavia che si tenga conto, per non lasciare neppure la più piccola lacuna nella definizione dell'energia, della possibilità di un'ipotesi anche se di per se stessa improbabile. Di fatto possiamo, in ogni caso in cui per un qualsiasi motivo la nostra definizione non risponda allo scopo, aiutarci in altro modo, precisamente non prendendo in considerazione per ora il caso in questione e rimandando per esso la definizione dell'energia ad una successiva occasione (pag.101), quando saremo in possesso di diverse proposizioni che ci consentano il calcolo del valore dell'energia in ogni circostanza.

A queste proposizioni arriviamo attraverso la formulazione del principio di conservazione dell'energia che, per tutti i casi in cui viene utilizzata la definizione dell'energia, possiamo enunciare in questo modo: l'energia di un sistema materiale in un dato stato, riferito ad un certo altro stato assunto come stato zero, ha un valore univoco o, in altre parole, sostituendo qui il tenore della definizione (pag.93): l'ammontare, calcolato in unità di lavoro meccanico (l'equivalente meccanico, il valore di lavoro), di tutti gli effetti che un sistema materiale provoca^(v99) nell'ambiente esterno quando passa in modo arbitrario da un certo stato ad uno stato zero arbitrariamente scelto, ha un valore univoco, quindi è indipendente dal modo del passaggio^(a5).

Mentre rimandiamo ad altro punto la questione circa la dimostrabilità di questa proposizione, vogliamo per il momento assumere la stessa come data, e in seguito fornire in primo luogo solo la prova che tutte le altre forme in cui si suole presentare il principio si lascino dedurre da quest'unica e quindi siano in essa contenute.

In primo luogo il principio dell'impossibilità del perpetuum mobile. Fissiamo lo stato zero del sistema materiale in modo che sia identico a quello dato, la cui energia deve venire determinata; dobbiamo perciò assegnare [a tale energia n.d.t.] il valore zero, dato che palesemente non si richiede nessuna variazione esterna per il passaggio dallo stato originario allo stato zero. Ma questo valore zero è univoco, qualunque sia il modo del passaggio, di conseguenza ricaviamo la proposizione: l'equivalente meccanico degli effetti che un sistema materiale provoca nell'ambiente esterno quando, muovendo da uno stato dato, si modifica in modo qualsiasi, ed infine ritorna di nuovo allo stato iniziale (più in breve: quando compie un processo ciclico), è uguale a zero.

Mentre questa proposizione, che esclude la possibilità della costruzione di un perpetuum mobile, discende necessariamente dal principio indicato sopra, essa non ha però, da parte sua, quel principio come logica conseguenza, come osserviamo proprio ora e come più tardi dimostreremo in modo più dettagliato.

Un'altra conseguenza discende dal principio nel modo seguente: noi possiamo pensare l'intero processo A- N che porta il sistema materiale (attraverso certi stati intermedi B, C, M)^(v100) fino allo stato finale N, suddiviso in un numero arbitrario di singoli processi consecutivi: A—B, B—C, M—N, in modo che lo stato finale di ogni singolo processo (tranne l'ultimo)^(v101) coincida con lo stato iniziale del successivo. Allora è chiaro che il valore del lavoro degli effetti esterni per l'intero processo A—N è pari alla somma dei rispettivi importi relativi ai singoli processi e quindi ne consegue la proposizione: l'energia del sistema nello stato A, relativa allo stato zero N, è pari alla somma delle energie negli stati A, B, C, , M relativi ai rispettivi stati zero B, C, D, N oppure, in una formulazione facilmente comprensibile,

$$[AN] = [AB] + [BC] + [CD] + \dots + [MN].$$

A questa proposizione ne aggiungiamo ancora una seconda, ugualmente semplice. Dall'uguaglianza ricavata ora, in unione col principio dell'impossibilità del perpetuum mobile, si ottiene:

$$[AN] + [NA] = [AA] = 0$$

da cui

$$[AN] = -[NA]$$

cioè: l'energia del sistema nello stato A, preso in riferimento allo stato N assunto come stato zero, è uguale e di segno opposto all'energia del sistema nello stato N, considerato in riferimento allo stato A come stato zero. Per i simboli adoperati valgono ovviamente le stesse regole di calcolo come per l'addizione geometrica di segmenti.

Possiamo ora usare contemporaneamente le proposizioni qui ricavate per perfezionare la definizione generale del concetto di energia, estendendola anche a quei casi che hanno dovuto finora restare esclusi dalla considerazione (pag.98). Infatti, se non è realizzabile il passaggio dallo stato A allo stato N, ma bensì quello dallo stato N allo stato A (come in uno dei due esempi sopra addotti)^(v102) allora definiamo l'energia cercata $[AN]$ come l'energia $[NA]$ presa col segno opposto e, se la trasformazione è ancor più complicata, introduciamo degli stati intermedi B, C, a piacere e dividiamo l'intero passaggio da A a N in una serie di singoli passaggi, che sono scelti in modo tale che si possano effettuare, ciascuno per se stesso, in verso diretto o contrario. Per questa via dobbiamo sempre giungere, utilizzando le proposizioni addotte, ad un'espressione dell'energia; infatti se così non fosse, se non si potesse combinare un passaggio da A a N attraverso l'inserimento successivo di stati intermedi opportuni, non ci troveremmo di fronte, in questi due stati, lo stesso sistema materiale, per cui diventerebbe assurda fin dall'inizio la questione del valore dell'energia. - Che questo modo di ampliare la definizione dell'energia non nasconda una complicazione del concetto artificialmente introdotta, ma risieda proprio nella natura della questione, si può meglio riconoscere dal fatto che in ogni calcolo pratico dell'energia di un sistema materiale (p.es in termochimica)^(v103) si procede in realtà esattamente come la nostra definizione prescrive, dato che non esiste nessun mezzo nè alcun metodo di misura che permetta di eludere la via per la quale siamo giunti alla determinazione del valore dell'energia.—

Se l'energia di un sistema materiale in uno stato A determinato viene riferita prima allo stato N, poi ad un altro N' assunti come stato zero, segue, dalla relazione:

$$[AN] - [AN'] = [AN] + [N'A] = [N'N]$$

che la differenza, causata dalla diversa scelta degli stati zero, nei valori dell'energia di A viene indicata da una quantità che non dipende dalle proprietà dello stato A, ma solo dalle caratteristiche dei due stati zero. Se perciò nella determinazione dell'energia lasciamo del tutto indeterminata la scelta dello stato zero, nell'espressione dell'energia rimarrà indeterminata solo una certa costante additiva.

Ma ora vogliamo dare al principio ancora un'altra versione che sarà maggiormente importante per le nostre future considerazioni. Immaginiamo un sistema materiale trasferito per mezzo di un processo qualsiasi da uno stato determinato A ad un altro stato B, allora il valore del lavoro degli effetti esterni così prodotti, nella notazione da noi adottata, è pari a

$$[AB] = [AN] - [BN]$$

dove N rappresenta uno stato del medesimo sistema, scelto in modo del tutto arbitrario, vale a dire: l'energia del sistema (riferita ad uno stato zero N scelto in modo arbitrario)^(v104) a causa del processo effettuato viene diminuita del valore del lavoro degli effetti esterni prodotti oppure, ciò che è lo stesso, l'energia del sistema è aumentata (variata)^(v105) del valore del lavoro degli effetti che, al di fuori del sistema, sono spariti (consumati, spesi)^(v106) per realizzare il cambiamento di stato.

Nel caso particolare in cui il processo avvenga in modo che nell'ambiente esterno non abbia luogo alcun effetto, allora è $[AB] = 0$ quindi $[AN] = [BN]$: l'energia nello stato A è pari a quella dello stato B.

Dunque l'energia di un sistema materiale^(v107) non cambia quando nell'esecuzione di un qualsiasi processo non subentrano variazioni esterne o, in altre parole, quando nel sistema hanno luogo solo azioni interne. In questa forma il principio si presenta come quello della conservazione dell'energia, ed è questa forma quella che, attraverso

un'interpretazione un po' modificata del concetto di energia, si dimostra così straordinariamente comoda per l'osservazione diretta, e fruttuosa per il seguito della trattazione. Finora abbiamo, infatti, sempre considerato l'energia di un sistema come una grandezza il cui concetto è essenzialmente connesso con quello degli effetti esterni che il sistema suscita nel caso di una qualsiasi trasformazione; infatti, secondo la definizione, l'ammontare dell'energia viene misurato solo attraverso questi effetti esterni; ne consegue che, se si vuole idealmente attribuire all'energia un qualsiasi substrato materiale, questo lo si deve cercare nel circondario del sistema, solo qui l'energia trova la sua spiegazione e, di conseguenza, anche la sua esistenza concettuale. Fintanto che si prescinde totalmente dalle azioni di un sistema materiale verso l'esterno, non si può neanche parlare della sua energia, poichè allora essa non è definita. In accordo con questa concezione sta la denominazione di Kirchhoff dell'energia come "funzione d'azione". D'altro canto vediamo dalla forma del principio ultimamente dedotta, che l'energia di un sistema rimane costante se un processo da esso eseguito non produce alcun effetto esterno, per quanto le azioni interne possano essere estese e diversificate. Questa proposizione ci porta a concepire l'energia contenuta in un sistema come una grandezza idealmente esistente e indipendente dalle azioni esterne. Il sistema possiede un certo quantum⁽ⁿ¹¹⁾ di energia che (fissato lo stato iniziale)^(v108) è interamente determinato dallo stato istantaneo, e potrebbe ogni volta (mediante riconduzione allo stato zero)^(v109) venire calcolato. Questo quantum rimane costante, viene conservato finchè il sistema non produce, o rispettivamente riceve, alcun effetto esterno e, attraverso le azioni interne, viene modificato solo il suo aspetto, non il suo valore. Dobbiamo quindi rappresentarci l'energia come insita nel sistema stesso, come una specie di riserva (secondo C. Neumann: "un capitale") indistruttibile da parte delle azioni interne, e questa concezione è estremamente comoda per l'osservazione diretta, data la sua analogia con il comportamento della materia che pure è trasformabile in diversi aspetti rimanendo invariata nella sua quantità (massa). Allo stesso modo in cui la massa totale di un corpo è rappresentabile come la somma delle masse delle singole sostanze chimiche in esso contenute, così l'energia di un sistema è composta dalla somma delle singole forme di energia, e si possono seguire le variazioni e trasformazioni di queste forme differenti fin nei più piccoli dettagli come le modificazioni della materia, cosa di cui in seguito troveremo numerosi esempi. Senza dubbio si basa in gran parte su questa analogia la facilità relativamente stupefacente e la vittoriosa chiarezza con cui il principio della conservazione dell'energia si conquistò nel giro di pochi anni il riconoscimento generale e si stabilì nelle convinzioni di ognuno.

Si potrebbe a questo punto sollevare la questione se poi sia effettivamente utile, per il sano sviluppo ulteriore del principio, allontanarsi in questo modo dalla definizione primaria del principio e attribuirgli un particolare significato fisico che, in fin dei conti, si fonda solo su di un'analogia e non dà adito dunque di per sé ad alcuna conclusione. In effetti bisogna ammettere che questa questione non può essere del tutto esclusa a priori, si può addirittura dimostrare che proprio attraverso questa concezione modificata il concetto di energia (non il suo valore, che è dato una volta per tutte dalla definizione generale) diventa qualcosa di indeterminato. Si pensi p.es. alle differenti interpretazioni che si possono dare al concetto di energia elettrostatica di un sistema di conduttori carichi in condizione di equilibrio. Alcuni cercano l'energia in uno stato vincolato dei dielettrici che circondano il sistema, esteso nello spazio a tutti i dielettrici, altri in un effetto a distanza delle cariche elettriche dei conduttori distribuite sulle superfici dei conduttori. Fintanto che si lascia irrisolta la contrapposizione tra le due teorie, vale a dire se ci si limita alla considerazione degli eventi nella natura che si possono spiegare in modo ugualmente soddisfacente con entrambe, la questione rimane del tutto aperta; l'indeterminatezza si trova dunque nel concetto di energia, non si conosce il posto che le si deve assegnare e non si ha alcun mezzo per trovarlo. Se ci si fosse, invece, arrestati alla definizione originaria, si sarebbe dovuta intendere

l'energia solo come un numero determinato, come un certo ammontare di lavoro, nel qual caso, naturalmente, ogni indeterminatezza del concetto sarebbe esclusa. Però è evidente proprio nell'esempio citato, cui seguiranno più tardi ancora altri, che l'interpretazione sostanziale del concetto di energia, di cui si parla qui, è connessa non solo ad una maggiore chiarezza ma anche direttamente al progresso nella conoscenza. Questo progresso si fonda sull'impulso per un proseguimento della ricerca fisica. Non ci si dovrà allora limitare a conoscere il valore numerico dell'energia del sistema, ma si cercherà di dimostrare in particolare l'esistenza di diverse forme di energia nei diversi elementi del sistema e di seguirne la transizione in altre forme e verso altri elementi, allo stesso modo come il movimento di un quantum di materia nello spazio. Ma non appena ci si addentra in questa questione, l'indeterminatezza che prima risiedeva nel concetto stesso assume la forma di un problema fisico risolvibile, e infatti c'è da aspettarsi che a questo modo, attraverso la ricerca dei modi di azione di tutti gli agenti attivi in natura fino nei minimi particolari, anche il significato fisico dell'energia diventi del tutto determinato, cosicchè possiamo allora considerare l'energia totale di un sistema materiale semplicemente come un aggregato di singoli elementi, ciascuno dei quali ha una propria determinata e particolare sede nella materia. Dobbiamo ammettere certamente che questa concezione (per così dire materiale) dell'energia come una riserva di azioni, la cui quantità è determinata dallo stato istantaneo del sistema, probabilmente più tardi avrà compiuto il suo servizio, e farà posto ad un'altra concezione, più generale e più elevata: al momento presente è ad ogni modo competenza della ricerca fisica costruire dappertutto fin nei minimi dettagli questa concezione come la più evidente e la più feconda, e valutare le sue conseguenze alla luce all'esperienza; in questa direzione si può scoprire ancora qualche nuovo punto di vista, come vedremo in seguito.

Mentre ci accingiamo ad attuare sistematicamente questo compito, con il che contemporaneamente faremo conoscenza delle forme del principio più comode per l'applicazione, partiamo dalla considerazione di un processo qualsiasi, che si svolga nella natura, con un qualsiasi sistema materiale. Un tale processo consiste sempre in una serie di variazioni che il sistema subisce, e precisamente si possono sempre distinguere due casi. O le variazioni che hanno luogo nel sistema sono completamente indipendenti dall'ambiente esterno nel quale si trova il sistema, così che il processo si svolgerebbe esattamente allo stesso modo se si pensasse rimossa dallo spazio tutta la materia non appartenente al sistema, in questo caso parliamo solo di effetti interni. Oppure: lo svolgimento del processo è essenzialmente influenzato dalla presenza di corpi esterni, allora dobbiamo prendere in considerazione, oltre agli eventuali effetti interni, anche quelli esterni. È chiaro che questa distinzione tra effetti interni ed esterni non è assoluta, ma dipende essenzialmente dalla scelta del sistema materiale: possiamo far diventare interno ogni effetto esterno considerando i corpi, nei quali o tra i quali esso ha luogo, inclusi nel sistema, e perciò possiamo sempre, per un arbitrario ipotetico processo, con opportune estensioni del sistema, far sì che ogni variazione si presenti come effetto interno. In senso stretto non esiste di norma alcun processo che consista solo di effetti interni; dato che tutti i corpi dell'universo stanno in continua scambievole relazione l'uno con l'altro, così che, per quanto noi estendiamo ulteriormente il nostro sistema materiale, ci sarà sempre materia al di fuori dello stesso che eserciti su di esso un qualche effetto. Invece: dappertutto dove ciò che importa sono i numeri, è sufficiente prendere in considerazione solo quelle grandezze che si trovano al di sopra di un certo limite minimo, così che noi di fatto, in ogni fenomeno della natura, malgrado l'esclusione di un numero infinito di corpi, riusciremo sempre a far sì che si debbano analizzare solo gli effetti interni. Nelle considerazioni immediatamente successive vogliamo sempre considerare effettuata questa scelta del sistema, così che, per il momento, si parlerà sempre solo di effetti interni.

In questo caso il principio della conservazione dell'energia, secondo pagina 102, si esprime nella forma che l'energia del sistema è una grandezza costante, immutabile

nel tempo. Se quindi indichiamo lo stato del sistema al momento dell'inizio delle variazioni come stato iniziale, e un altro ad esso successivo (in un tempo finito o infinitamente piccolo)^(v110) come stato finale del processo, allora l'energia del sistema nello stato iniziale è uguale a quella dello stato finale, ovvero: la differenza fra le energie nello stato iniziale e finale è uguale a zero. Per poter utilizzare vantaggiosamente questa proposizione è necessario allora conoscere l'espressione generale dell'energia del sistema. Ma l'energia è, come sappiamo, determinata interamente dallo stato istantaneo del sistema (a meno di una costante additiva)^(v111), si deve quindi poterla rappresentare come una funzione univoca di quelle grandezze che determinano questo stato. Si tratta perciò, ora prima di tutto, della questione: quali grandezze determinano lo stato di un sistema materiale? e questa questione ci conduce innanzitutto ad una discussione più rigorosa del concetto di stato.

Se ci si limita alla considerazione di fenomeni di movimento, si può contrassegnare lo stato di un sistema di punti^(v112) come la totalità delle posizioni e delle velocità di tutti i punti del sistema. Gli elementi rappresentativi dello stato sono dunque le coordinate spaziali dei punti e le loro derivate prime rispetto al tempo, solo da queste grandezze dipende l'energia del sistema; quando queste sono date, è determinato pure l'intero svolgimento del movimento, e di conseguenza tutte le variabili del sistema, in funzione del tempo. Questa definizione dello stato non si adatta, però, a qualsiasi fenomeno fisico e intendiamo perciò formulare la definizione più in generale nel modo seguente: lo stato di un sistema materiale in un determinato istante è l'insieme di tutte quelle grandezze i cui valori istantanei determinano l'intero andamento temporale del processo che ha luogo nel sistema. (Gli effetti esterni sono qui, appunto, esclusi.). L'energia del sistema appare dunque come una funzione determinata di queste grandezze.

A questi "elementi rappresentativi dello stato" (in breve "grandezze di stato") appartengono, oltre alle già citate variabili concernenti la meccanica, pure la temperatura, la densità elettrica e magnetica, l'intensità di corrente galvanica, etc. Sono invece escluse grandezze come l'accelerazione, la velocità di conduzione del calore^(v113), etc., poichè queste grandezze sono sempre già determinate attraverso le precedenti; dunque la loro conoscenza non è più necessaria per la determinazione dell'andamento temporale di un processo. Questo vale anche quando, come nella legge elettrica fondamentale di Weber, la forza viene posta come dipendente oltre che dalla posizione e dalla velocità anche dall'accelerazione; poichè d'altra parte la forza è assunta proporzionale all'accelerazione⁽¹⁴⁷⁾, si ottiene infine sempre una relazione che riconduce l'accelerazione una volta per tutte alla posizione ed alla velocità, così che essa non può mai esser assegnata in modo arbitrario, punto che a volte è stato trascurato.

In generale le grandezze di stato saranno indipendenti l'una dall'altra, così che per poter descrivere lo stato in modo completo bisogna conoscere il valore di ciascuna di queste variabili; frequentemente però accade che tra queste diverse grandezze sia prestabilita, da condizioni fisse e date a priori, una serie di relazioni, le quali fanno dipendere alcune di esse dalle rimanenti. Uno di questi casi si ha, p.es., nella meccanica quando tra le coordinate dei punti in movimento esistono determinate equazioni di condizione, come nel caso di due punti qualsiasi congiunti tra loro da una retta di lunghezza costante. Allora è chiaro che posizione e velocità non sono indipendenti l'una dall'altra, bensì lo stato è già determinato da un numero di variabili minore rispetto al caso in cui i punti siano del tutto indipendenti.

Casi simili s'incontrano spesso in altri processi. P.es. la legge di Ohm rappresenta una tale relazione tra le grandezze di stato quando viene applicata alla corrente stazionaria di una batteria galvanica. La forza elettromotrice della catena (somma delle tensioni elettriche di ogni coppia di conduttori a contatto), la resistenza e l'intensità di corrente sono tutte grandezze di stato, i valori di tutte e tre le grandezze devono perciò, in generale, essere dati in modo indipendente l'uno dall'altro se si vuole

determinare lo stato istantaneo dell'intero sistema di corpi che conduce la corrente; solo che la condizione, posta a priori, che lo stato sia stazionario, è causa di una dipendenza di queste grandezze l'una dall'altra, così che una di esse appare determinata per mezzo delle altre due. Se si lascia cadere questa condizione, nulla impedisce di supporre che in un certo istante esista un'intensità di corrente che non corrisponde al valore richiesto dalla legge di Ohm per lo stato stazionario, e finchè questa intensità non viene precisata non si può certo considerare lo stato come determinato; l'intensità di corrente in generale non rimarrà costante ma varierà in un certo modo per passare eventualmente allo stato stazionario. Questo, p.es., appare nel fenomeno del graduale aumento di una corrente dall'istante in cui viene chiuso il circuito; l'intensità cresce quindi in un tempo più o meno lungo, da zero al suo livello costante. Ma la legge di Ohm, presa nel suo significato generale, non esprime affatto una relazione tra le grandezze di stato, poichè l'espressione generale della forza elettromotrice contiene un termine che proviene dall'induzione da parte della propria corrente o di una estranea, e questo termine contiene da parte sua la derivata dell'intensità di corrente rispetto al tempo, che non fa parte delle grandezze di stato.

Consideriamo ancora un esempio ulteriore: la magnetizzazione temporanea. Se si pone, secondo la teoria usuale fondata da Poisson, il momento magnetico di un corpo magnetizzato per induzione, p.es. ferro dolce, proporzionale alla forza magnetizzante, si ottiene in questo modo di nuovo una relazione tra pure grandezze di stato, poichè anche la forza magnetica può essere appunto espressa direttamente dallo stato magnetico del corpo e dell'ambiente. Ma d'altra parte è altrettanto noto che questa relazione si riferisce solo ad un certo stato di equilibrio raggiunto dopo il trascorrere di un tempo finito^(v114) e che, nel caso si tenga conto di questo tempo, si può benissimo partire da uno stato nel quale il momento magnetico non ha ancora raggiunto il valore che assumerebbe nello stato di equilibrio in conseguenza di una determinata forza magnetizzante. È in ogni caso chiaro che ogni stato stazionario e ogni stato di equilibrio implicano una particolare equazione di condizione tra le grandezze di stato.

Ciò che rende così importante per le nostre considerazioni questa dipendenza, subentrante in determinati casi tra le grandezze di stato è la circostanza che in ciascuno di tali casi l'espressione dell'energia si può esprimere in diverse forme e perciò dà motivo proprio a quell'indeterminatezza del concetto già denunciata a pagina 104.

Vediamo ora infatti come si giunga all'espressione dell'energia nel caso di un dato sistema materiale in un certo stato. Innanzitutto bisogna tener presente che il valore numerico di questa grandezza, come risulta dalla definizione generale dell'energia, è sempre determinato in modo univoco; esso si trova, secondo le prescrizioni della definizione, quando, dopo aver dapprima fissato in modo arbitrario uno stato zero, si misura nel modo indicato il valore del lavoro degli effetti esterni che vengono provocati nel passaggio allo stato zero. Se è stato trovato il valore numerico per un determinato caso, non si ha ancora naturalmente l'espressione generale dell'energia del sistema nella sua dipendenza dalle grandezze di stato, ma si deve ulteriormente esaminare come cambia il valore numerico trovato, se vengono variati gli elementi rappresentativi del sistema. Questa indagine rientra nel compito generale di ogni ricerca sperimentale, per la quale si tratta di stabilire per tentativi la dipendenza quantitativa di un fenomeno da un altro. Posto ora che sia stata trovata la legge di questa dipendenza, si potrà allora esprimere l'energia del sistema come funzione delle grandezze di stato e così si è assolto al compito.

Ma proprio qui si dovranno distinguere due casi. Se le grandezze di stato hanno subito variazioni in tutti i modi possibili, allora si può rappresentare il valore dell'energia in un unico modo come funzione di queste grandezze, poichè allora le variabili sono tutte indipendenti l'una dall'altra. Questa funzione verrà da noi chiamata, in seguito, espressione "primaria" dell'energia, essa ha validità generale e incondizionata. Spesso però succederà che non si sia partiti da tutte le possibili combinazioni dei valori delle grandezze di stato, ma solo, p.es., da

stati di equilibrio o stazionari o in genere da quegli stati la cui varietà, come precedentemente illustrato, è limitata da una o più equazioni vincolari tra le grandezze di stato. In ognuno di questi casi l'espressione dell'energia come funzione delle grandezze di stato non è determinata in modo univoco ma può essere espressa in forme diverse, coll'utilizzo di quelle equazioni, sostituendo una qualsiasi variabile con un'altra qualsiasi; è allora impossibile anche decidere la forma dell'espressione primaria dell'energia, e così rimane fintanto che ci si limita agli stati considerati. Si vede dunque da qui, tra l'altro, che il calcolo dell'energia a partire dagli stati di equilibrio, o anche solo stazionari, non può mai condurre all'espressione primaria della stessa, come si può già scorgere dall'esempio, addotto a pagina 104, di uno stato di equilibrio elettrostatico. Difatti fino ad oggi non è ancora deciso con sicurezza quale delle due forme indicate rappresenti l'espressione primaria dell'energia e si può, fino ad allora, considerare come primaria ciascuna delle stesse ad arbitrio^(a6)

L'analogo vale per gli altri casi presentati a pagina 108 e seg.. Prendiamo p.es. una corrente galvanica stazionaria d'intensità i , forza elettromotrice e , resistenza complessiva w , allora si può esprimere il calore di Joule prodotto nell'unità di tempo nella resistenza w in diversi modi: come $i^2.w$ oppure come $c.i$ o anche come $c^2.w$. Quale di questi valori sia da considerare come espressione primaria della produzione di energia può essere deciso solamente se si passa da correnti stazionarie a non stazionarie, cioè si rinuncia alla condizione che lega l'una all'altra le grandezze di stato; si trova allora che solo $i^2.w$ rappresenta l'espressione primaria cercata dell'energia.

Vogliamo ancora discutere un caso parimenti pertinente, che riguarda la determinazione dell'energia di un corpo elastico. Quando un corpo perfettamente elastico (solido o fluido)^(v115) in virtù delle sue forze interne compie dei movimenti (oscillazioni) senza subire alcun intervento dall'esterno che sia collegato alla prestazione di lavoro, la sua energia è, secondo il nostro principio, indipendente dal tempo. Assumiamo ancora che il movimento sia tale che eventuali differenze di temperatura, sorte a causa delle deformazioni nel corso del processo, non vengano compensate dalla trasmissione del calore, come p.es. si può di regola presupporre nelle vibrazioni sonore; in tal caso lo stato istantaneo del corpo è sempre già determinato dalla posizione (deformazione) e velocità di tutte le sue particelle, in particolare la temperatura di una particella dipende solo dalla sua deformazione e perciò si può rappresentare anche il valore dell'energia solo come funzione della posizione e della velocità. Siccome poi la velocità è contenuta nell'espressione dell'energia sotto forma di forza viva, dall'invariabilità dell'energia totale possiamo trarre la conclusione che la somma della forza viva e di una certa funzione della deformazione è costante durante l'intero movimento. Questa funzione della deformazione assume notoriamente il nome di funzione delle forze o potenziale delle forze elastiche, essa rappresenta quel tipo di energia che è causato dalla totalità delle deformazioni. Tuttavia bisogna considerare che questa forma del valore dell'energia non è derivata dallo stato più generale del corpo, bensì solo da quegli stati che risultano separati l'uno dall'altro quando si esclude la trasmissione del calore. Abbiamo qui di nuovo il caso di un condizionamento tra le grandezze di stato, e difatti si può facilmente dimostrare che la funzione delle forze non costituisce l'espressione primaria dell'energia; essa perde perciò il suo significato se si elimina la limitazione fatta qui e si passa alla considerazione di stati più generali. Questo appare nel modo più chiaro nel caso dei moti dei cosiddetti gas perfetti, poichè per essi è nota in generale l'espressione primaria dell'energia. Consideriamo dunque un tale gas, che compie oscillazioni, magari a volume totale costante, in modo che rimangano esclusi effetti esterni, e calcoliamo dapprima la sua funzione delle forze col presupposto, stabilito sopra, che non abbia luogo alcuna conduzione di calore all'interno. Allora la pressione p di una particella materiale è completamente determinata dal suo volume w , infatti:

$$p = Cv$$

c_p
 c_v

dove C è una costante che dipende dalla natura del gas, c_p e c_v indicano i due calori specifici e la funzione delle forze assume il valore

$$-\int p \, d v =$$

1

c_p

c_v

$- 1$

.

C

v

c_p

c_v

$- 1$

$+ \cos t$

Conseguentemente al principio della conservazione dell'energia, la somma della forza viva totale delle oscillazioni e della funzione delle forze estesa a tutte le particelle materiali è indipendente dal tempo. La funzione delle forze non costituisce però l'espressione primaria dell'energia, essa, in unità di massa, risulta piuttosto

$$c_v \cdot \theta + \cos t \quad (v_{116})$$

del tutto indipendente dal volume. In questo caso è la temperatura

assoluta, c_v è riferita ad unità meccaniche di lavoro. Possiamo dunque ad ogni modo

esprimere la medesima proposizione anche nel caso in cui al posto della funzione delle

forze (riferita all'unità di massa) (v_{117}) usiamo l'espressione $c_v \cdot \theta + \cos t$

. In effetti ci

si convince immediatamente che entrambe le espressioni, sotto le condizioni qui assunte, sono equivalenti, dato che:

1

c_p

c_v

$- 1$

.

C

v

c_p

c_v

$- 1$

$= \theta$

infatti da questa, utilizzando il valore precedentemente indicato di p , otteniamo

1

$c_p - c_v$

$\cdot p v = \theta$

equazione che vale del tutto in generale per ogni stato di un gas perfetto.

Finchè ci si attiene al tipo di movimento qui considerato, è del tutto indifferente quale delle due forme di energia venga posta a base del calcolo e della visione concettuale; quella nominata per prima ha persino il vantaggio di non richiedere affatto di tener conto dei cambiamenti di temperatura; perciò la si utilizza principalmente nello studio delle proprietà elastiche. Non appena però viene infranta la limitazione posta, diventa necessario ricorrere all'espressione primaria dell'energia.

Siccome il raggiungimento della forma primaria dell'energia è, come abbiamo visto, legato alla soppressione di ogni condizione limitativa tra le grandezze di stato, non si può mai affermare di trovarsi veramente in possesso di

questa forma primaria, poichè non si ha in alcun modo la certezza che gli stati, coi quali si opera, siano in realtà i più generali. Così p.es. si usa considerare come espressione primaria dell'energia di due masse gravitanti l'una verso all'altra, il prodotto di queste masse diviso per la loro distanza, interpretazione questa che scaturisce dall'idea di un'azione diretta a distanza. Però sarebbe benissimo pensabile, ed in considerazione della direzione che l'evoluzione delle tecniche fisiche ha preso nei tempi più recenti, addirittura non inverosimile, che ad un certo momento si receda da questa concezione di una forza di attrazione immediata, istantaneamente operante a distanza, e si sostituisca al suo posto un'azione che si propaga da particella a particella in un tempo finito attraverso il mezzo intermedio mediante un'appropriata deformazione dello stesso. Se questa concezione dovesse veramente affermarsi, non potremmo più considerare come primaria l'espressione dell'energia finora utilizzata, la sua validità dipende dalla condizione che l'azione proveniente da una massa sia già giunta all'altra e che si sia formato nel mezzo intermedio uno stato stazionario. Questo stato però non è il più generale, e infatti l'espressione primaria dell'energia dovrebbe modificare la sua forma e rappresentarsi come integrale da estendere a tutto il mezzo intermedio. È chiaro che questa questione resta aperta e che ciascuna delle due espressioni dell'energia è ugualmente valida fintanto che si rinuncia alla ricerca di un tale stato più generale. Abbiamo già più sopra (pag.105) segnalato come la questione concernente l'espressione primaria dell'energia operi in modo stimolante per la ricerca di nuovi fenomeni.

Assumiamo, per il seguito, di conoscere l'espressione primaria dell'energia nella misura in cui la portata generale degli stati da noi considerati sia sufficiente. Dovunque non vi sia questa certezza limitiamo preferibilmente, per il momento, quella portata generale; per esempio quando in elettrostatica^(v118) ci limitiamo a considerare stati di equilibrio (della carica dettrica)^(v119) possiamo lasciare del tutto indeterminato se si debba cercare l'energia elettrostatica con Faraday-Maxwell all'interno del dielettrico o con Coulomb-Weber sulla superficie dei conduttori, e considerare a piacere ognuna delle espressioni corrispondenti come l'espressione primaria dell'energia⁽ⁿ¹²⁾. Del resto vogliamo immaginarci il sistema materiale fondamentale nelle circostanze le più molteplici possibili: vi si possono trovare corpi in movimento od in quiete, più caldi o più freddi, luminosi o oscuri, conduttori o non conduttori, corpi elettrici attraversati da correnti e corpi magnetici, in breve nel sistema possano esser rappresentati tutti i possibili fenomeni fisici. Allora si manifesta in primo luogo il fatto singolare che l'espressione (primaria)^(v120) dell'energia compare sotto la forma di una somma i cui singoli termini sono composti da determinate grandezze di stato corrispondenti alle singole particolari forme del fenomeno. Con ciò il valore dell'energia totale si scompone da solo in un gran numero di singole energie, che sono indipendenti l'una dall'altra e di cui ognuna deriva in modo particolare da una singola proprietà dello stato considerato. Siamo perciò indotti a distinguere nel sistema diversi tipi di energia: energia meccanica, termica, chimica, elettrica e magnetica, sommando le quali otteniamo l'energia totale del sistema.

Questo fatto, che possiamo contrassegnare come principio di sovrapposizione (superposition) delle energie, è essenzialmente in relazione con la circostanza che molti fenomeni che compaiono in natura procedono in modo del tutto indipendente l'uno dall'altro: il riscaldamento di un corpo non modifica la sua gravità, una carica elettrostatica non ha influenza sul magnetismo, etc., sia che questa circostanza venga considerata causa o conseguenza di quel fatto. Vogliamo qui accettare il principio della sovrapposizione delle energie, che esprime la generalizzazione di tutta una serie di proposizioni ben note in fisica, semplicemente come dato dall'esperienza: esso ci fornirà, nell'ulteriore trattazione del nostro lavoro, un aiuto estremamente valido per l'accesso ad ulteriori deduzioni dal principio di conservazione.

Per facilitare la visuale complessiva sui singoli termini di quella somma di energie

si è proceduto a delle suddivisioni della stessa secondo diversi punti di vista, quale, oltre a quella già accennata che si basa sulla diversità dei singoli fenomeni della natura e che può esser ben ritenuta la più ovvia, la suddivisione in due addendi: energia in atto e potenziale (energia del movimento e della posizione, pag. 68). Questa suddivisione si basa sull'assunto che tutte le variazioni in natura abbiano carattere meccanico; essa computa tutti i termini dipendenti solo dalla velocità come energia in atto, quelli che dipendono solo dalla posizione come energia potenziale. Da quando si è trovato, però, che vi sono anche tipi di energia che sono determinati insieme dalla posizione e dalla velocità, l'utilizzo di questa suddivisione è diventato alquanto dubbio. Questo è il caso p.es. dell'energia cosiddetta elettrocinetica di una corrente galvanica, la quale non dipende solo dall'intensità della corrente, ma anche dalla posizione relativa dei singoli elementi [attraversati dalla n.d.t.] corrente; che questa energia si debba ritenere in atto oppure potenziale non si può intravedere con chiarezza, abitualmente, invero, accade il primo caso. (Cfr. 3° Cap.). In fondo ciò non ha naturalmente nessuna importanza, poichè il valore dell'energia totale rimane inviolato da questa diversità di veduta. Un altro modo di suddivisione è fornito dalla distinzione tra energia interna ed esterna, in cui come energia esterna s'intende sostanzialmente la stessa cosa indicata in senso stretto come energia meccanica (energia del movimento di massa); come energia interna, quindi, il resto dell'energia totale. In tempi più recenti Helmholtz, ancora secondo un altro punto di vista, precisamente la possibilità di trasformazione diretta in lavoro meccanico, ha proceduto alla suddivisione in energia libera e vincolata.

Mentre rimandiamo la discussione delle singole forme di energia all'ultimo capitolo di questo scritto, vogliamo qui, per ora, solo accennare alla comodità derivante dal principio della sovrapposizione dell'energia per la rappresentazione del concetto e per il calcolo del valore dell'energia totale. Dopo di ciò possiamo immaginarci l'energia totale del sistema come una riserva composta da un semplice incolonnamento di singole energie, proprio come il peso totale di un corpo è dato dall'accumulo l'uno sull'altro di tutti gli elementi chimici in esso contenuti. Inoltre la grandezza di ogni singolo tipo di energia può essere calcolata singolarmente, in modo del tutto indipendente da altre proprietà del sistema considerato, purchè si conoscano le particolari grandezze di stato che ad essa corrispondono. Giungiamo quindi ad assegnare idealmente ad ogni forma di energia il suo posto particolare nella materia e raggiungiamo con ciò il vantaggio pratico di una visuale semplificata delle singole forme di energia, il che ci preserva dall'errore di tralasciare nel calcolo dell'energia totale la considerazione di una di esse. In generale ad ogni forza attiva nel sistema, o comunque ad ogni particolare proprietà del sistema, corrisponde una particolare forma di energia che si può immaginare come localizzata nel posto stesso in cui si manifesta quella proprietà.

Qualora nel sistema siano attive solo quelle forze che operano solo a distanze incommensurabilmente piccole, l'effetto su una qualsiasi particella materiale dipenderà soltanto dallo stato di questa particella stessa, o da quello del suo ambiente immediatamente circostante, e allora l'energia del sistema si ottiene semplicemente dalla somma delle energie di tutte le sue particelle materiali. E però essenzialmente diverso quando sono presenti forze che operano direttamente a distanza, poichè l'energia determinata da una tale forza dipenderà in generale dalle stesse grandezze come la forza stessa e quindi soprattutto dalla distanza dei due elementi che agiscono l'uno sull'altro. In questo caso l'energia, secondo la sua definizione concettuale, è basata sulla posizione contemporanea di entrambi gli elementi, la sua sede non si trova quindi in un unico punto nello spazio e non si può più porre l'energia totale uguale alla somma delle energie dei singoli elementi materiali, piuttosto bisogna aggiungere a questa somma ancora quelle forme di energia che sono provocate dalle azioni a distanza fra coppie di elementi. Ammesso ora di aver trovato l'espressione dell'energia totale come somma delle singole forme di energia, dobbiamo allora porre il suo valore indipendente dal tempo per ogni variazione del sistema, mentre le singole forme di

energia possono modificare la loro grandezza l'una a spese dell'altra; quindi ogni processo, che accade in natura, si può intendere come una trasformazione, l'una nell'altra, delle singole forme di energia mentre la loro somma, la riserva totale di energia presente nel sistema, non può essere nè aumentata nè diminuita.

Vogliamo ora avanzare di un passo. Le considerazioni finora fatte si riferivano a variazioni del sistema, causate esclusivamente da effetti interni, mentre la materia non appartenente al sistema non esercitava alcun influsso su di esso. Se l'applicazione del principio dovesse limitarsi solo a questo caso, allora se ne trarrebbe relativamente poco vantaggio, dato che esso ci fornirebbe un'unica equazione, proprio quella che esprime la costanza dell'energia. Inoltre, per un dato processo si dovrebbe, per poter escludere tutti gli effetti esterni, in generale includere sempre nel sistema un considerevole numero di corpi, perciò il numero delle grandezze che determinano lo stato sarebbe cospicuo e quell'unica equazione del principio della conservazione dell'energia servirebbe poco. Vogliamo ora però dimostrare che dal principio possiamo ricavare in generale, per un qualsiasi processo che ha luogo in un sistema materiale, non soltanto una ma un numero infinito di equazioni, così che lo stesso ci può spesso servire per determinare in modo univoco l'intero svolgimento temporale del processo.

Qui l'analogia del nostro principio con quello della conservazione della materia si mostra in tutta la sua fecondità. La somma delle masse ponderabili contenute in natura

è invariabile, però esse cambiano la loro posizione nello spazio; se dunque consideriamo un determinato, circoscritto, volume di spazio, la massa ivi contenuta non è in generale costante, ma la variazione (aumento) di questa massa in un certo intervallo di tempo è pari alla massa entrata in questo tempo dall'esterno nel volume.

Una proposizione del tutto analoga la possiamo dedurre per l'energia di un sistema materiale. Infatti allo stesso modo in cui la materia cambia la sua posizione nello spazio, mentre la somma rimane costante, così l'energia cambia la sua posizione e la sua forma nella materia, cosicchè possiamo fare la seguente considerazione: in un sistema materiale che non sia sottoposto ad alcuna azione dall'esterno, l'energia rimane costante.

Scegliamo ora dal sistema un complesso a piacere di elementi materiali e consideriamoli come un particolare sistema; esso avrà quindi la sua particolare energia, che può esser descritta secondo il modello dell'espressione dell'energia del sistema totale. Questa energia in generale non resterà costante, essa lo sarebbe solo se il sistema considerato nel corso del processo non subisse alcuna azione dall'esterno, cosa che in generale non avverrà; perciò l'energia si modifica, e precisamente a misura delle azioni esterne. Attraverso le azioni esterne viene introdotta (trasferita), dall'esterno nel sistema, dell'energia (positiva o negativa)^(v121), in un ammontare che viene determinato attraverso la proposizione sviluppata a pag. 102: la variazione (aumento)^(v122) dell'energia, corrispondente ad una determinata variazione dello stato di un sistema materiale, è pari al valore del lavoro delle azioni che sono state consumate all'esterno del sistema per attuare la modificazione dello stato. Naturalmente in questa proposizione è inclusa la precedente come caso particolare poichè, se non ha luogo alcuna azione esterna, non può neanche essere trasferita energia nel sistema.

L'indicata analogia con la variazione della materia contenuta in un determinato volume di spazio vale solo fino ad un certo limite, che consiste nel fatto che la massa totale esistente in uno spazio è pari alla somma delle masse contenute nelle singole porzioni di spazio, mentre una simile proposizione non esiste per l'energia totale contenuta in un sistema materiale, per lo meno non quando si ammette l'actio in distans (pag.118). L'energia di un sistema contiene piuttosto, oltre alla somma delle energie delle singole parti materiali, ancora altre forme di energia e perciò il suo comportamento diventa un po' più complicato.

Quando, a causa di un dato processo, un sistema materiale subisce una determinata variazione di stato, si può spesso facilitare essenzialmente il calcolo del valore del lavoro delle azioni esterne impiegate, considerando che questo valore del lavoro è del tutto indipendente dalla via per la quale è stata prodotta la variazione dello

stato e che quindi in luogo del processo dato e delle azioni esterne date se ne possono sostituire altri a piacere, basta che essi suscitino la medesima variazione dello stato del sistema; infatti allora anche il valore del lavoro cercato è di nuovo lo stesso.

Consideriamo a questo proposito un esempio preso dalla meccanica. L'energia di un corpo (con uno stato interno costante)^(v123) considerato in moto, è la sua forza viva; essa rimane costante fintanto che non hanno luogo effetti esterni. Qualora però dall'esterno agissero sul corpo delle forze di natura meccanica si avrebbe attraverso di esse un trasferimento di energia al corpo. Gli effetti esterni inoltre possono essere di tipo estremamente vario, a seconda della natura delle forze ipotizzate (forze d'urto, di attrito, forze che operano a distanza), nell'ambiente circostante possono quindi essersi verificate variazioni esterne di tipo meccanico o interne di tipo molecolare oppure termiche o elettriche: il valore di lavoro di queste azioni esterne è però sempre pari al lavoro che le forze ipotizzate compiono sul corpo, qualsiasi sia la loro origine. Questo è dunque l'ammontare^(v124) dell'energia trasferita nel corpo, cioè l'incremento della sua forza viva.

Si vede ora facilmente che il numero delle applicazioni del principio nella sua ultima formulazione è, per un dato processo, addirittura infinito, sia per quanto riguarda il tempo che la materia. Infatti possiamo porre a base della considerazione, da un lato un tempo grande o piccolo a piacere, in particolare un tempo infinitamente piccolo, del quale ci serviamo per processi elementari, dall'altro un complesso di elementi materiali grande o piccolo a piacere, in particolare uno infinitamente piccolo cioè un corpo elementare; per ognuno di tali complessi il principio fornisce una particolare equazione. Si deve ogni volta scegliere quella combinazione per la quale il calcolo si configura nel modo più comodo e si deve naturalmente avere sempre l'avvertenza di fissare a priori in modo preciso il sistema materiale posto a base - lo chiameremo in seguito brevemente "sistema base"-.

Prendiamo p.es. un qualsiasi quantum di gas che viene modificato nel suo stato per compressione o afflusso di calore dall'esterno. Fintanto che consideriamo il solo gas come sistema base, le azioni esterne utilizzate consistono nella variazione della posizione del corpo sotto compressione e nella cessione di calore da parte del serbatoio di calore utilizzato; l'energia del gas aumenta dunque del valore di lavoro della compressione e del calore fornito. È inoltre completamente indifferente se la compressione viene realizzata mediante un pistone pesante, che abbassandosi fornisce lavoro, oppure mediante un altro gas che si espande, e con ciò perde calore etc. Ciò che qui importa è soltanto ed unicamente il lavoro meccanico con il quale si può realizzare appunto questa compressione, è indifferente in quale modo. (Pag.121)^(v125).

Assumiamo ora più in particolare che la compressione venga realizzata con un pistone caricato di un peso che faccia equilibrio alla pressione del gas, e includiamo questo peso nel sistema base; in tal modo scompare il lavoro di compressione come azione esterna, invece al suo posto subentra il lavoro della forza di gravità, derivante dall'attrazione della terra, agente sul peso, uguale in grandezza al precedente. Se noi poi includiamo anche la terra nel sistema base, scompare del tutto come azione esterna il lavoro di cui si è parlato, mentre compare nell'espressione dell'energia del sistema base un nuovo termine, e cioè l'energia data dalla gravità del peso, funzione dell'altezza alla quale esso si trova. Come queste considerazioni appaiono semplici ed evidenti per il caso esposto, altrettanto diventano importanti non appena si passi da questi stati semplici ad altri alquanto più complicati nei quali, p.es., il peso premente possiede una determinata velocità e la pressione del gas non è più pari al peso del carico.

Forse non dovrebbe riuscire inopportuno, in questa occasione, far cenno ad una forma di linguaggio che, se erratamente intesa, può facilmente dare motivo a malintesi.

Si parla talvolta di energia di un corpo pesante come prodotto del suo peso per l'altezza del suo baricentro. Questa definizione non è pertinente se si pensa il corpo come sistema base, poichè l'energia di un corpo dipende sempre soltanto dal suo proprio stato, mai contemporaneamente dalla disposizione di masse esterne; in effetti,

questo modo di esprimersi non si trova per altre forze centrali. Per poter quindi parlare di energia della gravità, si deve sempre (anche se tacitamente)^(v126) pensare inclusa la terra nel sistema base, altrimenti il lavoro della forza di gravità deve esser messo in conto non come forma di energia ma come azione esterna (della terra eventualmente presente nelle vicinanze, vedi pagina 93).

Se prendiamo in considerazione più da vicino il significato della generalizzazione che abbiamo intrapreso per l'originaria formulazione del nostro principio, esso si basa essenzialmente sul fatto che quell'unica equazione, che esprime la conservazione dell'energia per un sistema sottratto a tutti gli effetti esterni, è stata scomposta in un gran numero di equazioni che regolano le variazioni dell'energia, l'assunzione e la cessione della stessa nelle singole parti del sistema, a seconda degli effetti esterni corrispondenti. Inoltre su di un punto vorremmo ancora richiamare specialmente l'attenzione. Se suddividiamo l'intero sistema, che non è soggetto ad alcuna azione esterna e la cui energia pertanto è costante, in due parti che consideriamo una per volta come sistema base, sarebbe errato supporre che l'energia assunta da una delle parti, in un tempo determinato, sia pari a quella ceduta, nel medesimo tempo, dall'altra parte. Questa proposizione potrebbe essere valida soltanto quando l'energia dell'intero sistema fosse pari alla somma delle energie dei due sistemi parziali, cosa che, come già abbiamo rilevato più volte, in generale non si verifica. Prendiamo come esempio due punti materiali che agiscano uno sull'altro con una forza centrale. L'energia del sistema è allora la somma delle forze vive e del potenziale della forza centrale; essa non varia nel tempo. L'energia di un singolo punto è la sua forza viva, la sua variazione viene misurata attraverso l'azione esterna che il punto subisce, cioè attraverso il lavoro che la forza compie su di esso. Inoltre può evidentemente benissimo succedere che in un tempo determinato venga, dall'esterno, trasferita su ognuno dei due punti energia positiva e che, di conseguenza, entrambe le forze vive aumentino contemporaneamente. Solo se gli effetti a distanza vengono a mancare del tutto, come in fenomeni quali il movimento ondulatorio elastico o la conduzione di calore, si può dire che l'energia trasmessa ad un complesso materiale viene contemporaneamente tolta ad un altro.

Di norma le concezioni, dalle quali si parte per l'interpretazione dell'attività delle forze della natura, svolgono qui, ove si parla dell'energia di un sistema materiale scelto in modo arbitrario, un ruolo ancor più importante che non sopra, dove consideravamo solo sistemi che non subivano alcuna azione esterna. Ivi (pag. 110) si trattava solo della forma primaria dell'energia, la cui grandezza era, per ogni stato del sistema, determinata dalla definizione generale; lo sarebbe anche qui, se fossimo sempre in grado di realizzare la misurazione come prescrive la definizione. Siccome questo, però, dati gli imperfetti mezzi di osservazione, non è sempre possibile, può accadere che per l'energia di un dato sistema materiale si ottengano non solo diverse forme ma anche valori numerici completamente diversi, a seconda delle ipotesi fatte circa la natura delle forze agenti, e che non si sia in grado, per via sperimentale, di comporre la differenza insorgente. Un esempio di ciò è fornito dalla natura, da noi già ripetutamente discussa, del campo elettrico. L'energia di una porzione comunque scelta di un dielettrico, è, secondo i punti di vista di Faraday, diversa da zero; si può ottenere una prestazione di lavoro nella transizione di questa parte dallo stato di coercizione allo stato neutro, mentre, secondo la rappresentazione di Weber, l'isolante si trova sempre nel medesimo stato (prescindendo da eventuali modificazioni secondarie)^(v127), indipendentemente dalla presenza o meno di carica elettrica libera nei conduttori. Fintanto che con ricerche più specifiche non viene presa alcuna decisione definitiva su questa questione, sarà quindi necessario, prima di procedere alla stesura dell'equazione che esprime il principio dell'energia, fissare dapprima esattamente ogni volta il punto di vista al quale ci si vuole attenere nell'interpretazione dei processi da esaminare.

La scomposizione da noi effettuata dell'equazione della conservazione dell'energia si basa sul considerare come sistema base un complesso materiale estratto

in maniera arbitraria dall'originario sistema materiale, e l'energia che in esso entra o esce. Invece della scomposizione del sistema nelle sue parti materiali possiamo, con lo stesso diritto e a volte con notevole vantaggio, eseguire un'altra scomposizione, e cioè quella in porzioni di volume. Un dato volume di spazio contiene, ad un dato istante, sempre un determinato sistema materiale, e si può parlare di energia di volume nella misura in cui questo sistema possieda una determinata energia nel medesimo istante. L'energia di un volume di spazio fissato non varierà col tempo se nel volume non entra, nè esce materia, e se non hanno luogo azioni esterne sulla materia in esso contenuta; la variazione dell'energia proviene sempre dall'una o dall'altra di queste due cause, così che possiamo formulare la seguente proposizione: **l'energia trasferita in un volume di spazio è condizionata una volta dagli effetti esterni operanti sulla materia ivi contenuta ed inoltre dall'ingresso di nuova materia.** Sarà allora importante stabilire se la formulazione delle espressioni per l'energia così trasferita nel volume risulti facilitata dalle particolari condizioni del caso considerato.

Difatti si trova più di un'applicazione in cui questa proposizione rende dei comodi servizi. Così p.es. se ne serve essenzialmente Clausius per il calcolo del calore (di Joule) prodotto in un conduttore da una corrente galvanica stazionaria, sia che la materia del conduttore si trovi in quiete, come nei conduttori metallici⁽¹⁴⁸⁾, sia che la materia si pensi in cammino insieme alle cariche elettriche, come nei conduttori elettrolitici⁽¹⁴⁹⁾. Immaginiamo un volume, fissato a piacere, attraversato da corrente, allora l'energia ivi contenuta aumenterà: 1) per azioni esterne, 2) per ingresso di nuova materia. Per il calcolo di questo incremento importa allora essenzialmente da quale idea si parte circa la natura della corrente galvanica. Supponiamo per il momento che le particelle elettriche si comportino come atomi materiali, con inerzia infinitamente piccola, che vengono spinti in avanti nella loro traiettoria dalla forza di attrazione (o repulsione)^(v128) operante a distanza, della carica elettrica libera totale presente nel sistema conduttore, nel qual caso possiamo, per amor di semplicità, presupporre come mobile solo un tipo di carica elettrica, allora l'energia di una particella materiale (carica elettrica, ione) che si muove in una corrente costante è indipendente dalla sua posizione (non variabile p.es. con la funzione potenziale poichè questa deriva da masse esterne ^(v129)). Poichè ora in un tempo determinato entra nel "volume base" sempre tanta materia quanta ne esce, allora per effetto di questa circostanza non viene prodotta nessuna variazione di energia e restano solo da prendere in considerazione le azioni esterne. Queste forniscono un incremento di energia pari al lavoro che compiono le forze del sistema complessivo sulla materia in moto in tutto il volume. Quindi l'energia del volume aumenterà dell'ammontare di questo lavoro e poichè, a causa dello stato stazionario, l'energia elettrica è costante, l'incremento deve andare a favore dell'energia termica.

Alquanto diverso diventa il ragionamento se ci si rappresenta l'elettricità come un fluido sottile incompressibile^(v130) che viene spinto attraverso il conduttore da una forza operante a distanze incommensurabilmente piccole (una specie di pressione). Anche in questo caso l'energia di una particella che si muove è indipendente dalla posizione (si confronti l'energia di fluidi incompressibili, Cap. 3°)^(v131) perciò qui, una modificazione dell'energia nel volume considerato sarà tanto meno determinata, come sopra, dall'entrata in esso di materia, Per quanto riguarda le azioni esterne, esse si limitano in questo caso al lavoro delle forze operanti sulla superficie del volume (tutti gli altri sono effetti interni). Questo lavoro è in ogni punto proporzionale al valore della funzione potenziale (allo stesso modo in cui nei fluidi è proporzionale alla pressione), esso è maggiore nei punti di entrata della corrente rispetto a quelli di uscita, ed otteniamo perciò, per il lavoro totale prodotto dalle azioni esterne, un'espressione positiva il cui valore concorda con quello ricavato dalle considerazioni di cui sopra. Si supponga infine, come alcuni vogliono, che la corrente elettrica non consista in un trasferimento di materia ma, sul tipo della conduzione del calore, in una propagazione di particolari forme di movimento; allora è necessario, per spiegare il

calore di Joule, assumere che la forza viva di questi movimenti, entrante nel volume in un certo intervallo di tempo sia, per un determinato ammontare, maggiore di quella uscente, dunque che, a causa della resistenza del conduttore, si determini una specie di assorbimento delle oscillazioni che costituiscono la corrente.

Dalle proposizioni ricavate siamo quindi in grado per ogni elemento materiale (e per ogni elemento di volume)^(v132) di un corpo, di dedurre dal principio dell'energia una particolare equazione e perciò abbiamo a disposizione in effetti, come è già stato osservato sopra, per qualsiasi arbitrario processo, infinite equazioni, che intervengono in modo determinante nel suo svolgimento. Se dunque ora si tratta di determinare in modo univoco lo svolgimento temporale del processo, non dobbiamo limitarci ai risultati ottenuti; non siamo ancora in grado infatti coi mezzi finora raggiunti di soddisfare questo compito; lo saremmo solo se le variazioni di un singolo elemento materiale dipendessero da un'unica variabile (corrispondentemente a quell'unica equazione che possiamo formulare per l'elemento)^(v133) cosa che in generale non avviene.

Se però vogliamo avanzare ancora di un passo, ci possiamo in molti casi procurare i mezzi che sono sufficienti per la soluzione del compito proposto; questo passo consiste nell'introduzione del principio di sovrapposizione delle energie, già prima occasionalmente utilizzato. L'energia di un sistema materiale si può rappresentare, secondo l'esperienza, come la somma delle singole forme di energia che sono del tutto indipendenti l'una dall'altra, perciò la riserva totale di energia si suddivide, anche in modo concettuale, in una serie di singole energie, ciascuna delle quali può esser determinata per se stessa. Se ora vengono esercitate azioni dall'esterno sul sistema, mediante le quali l'energia viene in esso trasferita, si può in generale suddividere anche queste azioni in diverse specie. Ciascuna di queste specie di azione provoca nel sistema una determinata variazione del tipo di energia che le corrisponde, così che l'equazione che esprime la relazione tra la modificazione dell'energia totale e le azioni esterne si suddivide in una serie di singole equazioni, ciascuna delle quali determina la variazione di un tipo di energia, in relazione ad una particolare azione esterna. Siamo in presenza di un'ulteriore scomposizione dell'equazione dell'energia che si distingue dalla precedente per il fatto che prima abbiamo suddiviso il sistema materiale in singole parti di materia (o di volume)^(v134), mentre ora l'energia viene suddivisa in forme singole.

Pensiamo ad esempio ad un corpo che si muove liberamente nello spazio. La sua energia si scinde in due parti: la forza viva del suo moto visibile e la sua energia interna (p.es. termica)^(v135). Fintanto che non hanno luogo effetti esterni, l'energia totale resta costante. Ma non soltanto questa rimane costante, anche ciascuna delle due forme di energia: il corpo si muove con velocità costante e rimane a temperatura costante, in nessun caso avrà luogo una modificazione di queste grandezze senza un corrispondente effetto esterno, quantunque, secondo il principio generale, una conversione di un tipo di energia in un altro sarebbe benissimo ammissibile.

Immaginiamo inoltre che vengano esercitate sul corpo determinate azioni dall'esterno, le quali possono consistere una volta in una forza meccanica che agisce a distanza (p.es. la gravità)^(v136) oltre ad un afflusso di calore (p.es. da irradiazione)^(v137), allora l'energia del corpo crescerà della somma del lavoro fornito dalla forza e della quantità di calore affluito. Ma possiamo ancora aggiungere: le azioni esterne si decompongono in questo caso in due tipi diversi, ciascuno dei quali influisce solo sulla forma di energia ad esso corrispondente: il lavoro della forza modifica solo la velocità ma non la temperatura del corpo, ed il calore affluito fa elevare solo la temperatura, non però la velocità. I diversi effetti con le loro corrispondenti energie appartengono a campi completamente separati e danno luogo perciò ciascuno ad una particolare equazione.

Tuttavia si può ben obiettare che in questo, come in tutti i casi analoghi, non può essere mai fissata^(v138) a priori l'indipendenza l'una dall'altra delle singole forme di energia come pure dei tipi di azione esterna, ma essa deve venir prima giustificata

sperimentalmente. Facilmente si può immaginare che le radiazioni termiche, che consistono in oscillazioni dell'etere, esercitano un'azione diretta di tipo meccanico sul corpo, anche se finora non si è potuto provare un tale effetto con sicurezza^(a7) e d'altra parte è evidente che una forza meccanica, quando opera non a distanza ma p.es. in forma di attrito od urto sulla superficie del corpo, si può trasformare direttamente in calore, per lo meno in gran parte. È anche facilmente pensabile che due tipi di energia, che per un certo tempo sono stati considerati indipendenti fra loro e che nel calcolo^(v139) di certi fenomeni possono sempre essere considerati come indipendenti, vengano un bel momento a trovarsi in una relazione di dipendenza tra loro, in seguito ad una più approfondita conoscenza delle forze di natura.

Qui urtiamo infatti contro un limite di applicabilità (non di validità) del principio dell'energia, poichè se le singole forme di energia variano in modo non più indipendente l'una dall'altra ma ciascuna a seconda degli effetti esterni ad essa corrispondenti, allora dobbiamo sospendere la scomposizione dell'equazione dell'energia. Il principio dell'energia fornisce in questo caso per un elemento materiale un numero di equazioni minore di quello necessario per il calcolo della sua variazione di stato. A questo appartengono, tra l'altro, tutti quei casi nei quali si svolgono processi all'interno di un elemento senza alcuna relazione diretta con gli effetti esterni, come p.es. tutti i processi di tipo esplosivo in cui minime azioni esterne possono determinare le più grandi e più eterogenee trasformazioni reciproche di singole forme di energia. A questo punto sorge la domanda: secondo quale legge, in qual senso ha luogo in tali casi lo scambio delle energie? Questa domanda esce dall'ambito delle nostre presenti ricerche, la risposta ad essa non può più provenire semplicemente dal punto di vista della tesi della conservazione dell'energia ma invece deve basarsi su principi interamente nuovi, indipendenti da essa. Un tale principio è già incluso nel secondo principio fondamentale della teoria meccanica del calore, fondata da Carnot e Clausius, che ci fornisce chiarimenti sulla direzione in cui procede la trasformazione delle singole forme di energia l'una nell'altra^(a8).

Ma a prescindere dalle limitazioni espresse, non viene sminuito il grande valore^(v140) insito nella suddivisione degli effetti esterni a seconda del loro influsso sulle singole forme di energia. Esso riposa essenzialmente sulla conquista di uno stabile punto di vista dal quale si possano scrutare i modi di trasformazione fra loro delle forme di energia e quindi soprattutto la molteplicità delle forze della natura. Ma poi si viene sempre nuovamente condotti alla domanda: quali scambi di energia hanno luogo indipendentemente l'uno dall'altro? La risposta a questa domanda fornisce il primo mezzo per porre ordine in quei fenomeni, all'apparenza così intricati, che hanno luogo nell'ambito del più piccolo processo e per renderli singolarmente accessibili all'indagine sperimentale. Senza il principio della sovrapposizione dell'energia non si potrebbe separare l'energia meccanica dal calore, l'elettricità dal magnetismo e sarebbe a priori del tutto inammissibile la suddivisione di tutta la fisica nei diversi rami. Per ora siamo poco in grado di rispondere tanto alla questione se potremo in futuro distinguere un numero minore di tipi di energia che non ora, e se forse tutti si lasceranno ridurre ad uno o due tipi, come pure alla questione se la materia ponderabile sia sostanzialmente diversa o no dall'etere luminoso. Nell'ultimo capitolo di questo scritto ci sforzeremo di dimostrare nel modo più chiaro che noi però siamo di fatto in grado, basandoci solo sul punto di vista ora acquisito, di derivare, con l'aiuto delle formulazioni sviluppate per il principio della conservazione dell'energia, tanto le leggi fondamentali della meccanica quanto le restanti parti della fisica, allo stesso modo come abitualmente viene fatto, muovendo da diversi punti di partenza; contemporaneamente questo lavoro ci offrirà in gran quantità notevoli applicazioni delle proposizioni qui espresse alle singole forme di energia.

Nel concludere qui le indagini che ci hanno portato alla formulazione del principio di conservazione dell'energia in una forma particolarmente comoda per l'applicazione, vogliamo utilizzare la parte finale di questo capitolo per passare in

rassegna il numero e l'importanza delle dimostrazioni che si possono addurre per la correttezza del principio. Si è diffusa, invero, in tempi più recenti anche l'affermazione che non sia nè possibile nè necessario dimostrare il principio, poichè esso è valido a priori, vale a dire esso rappresenta un aspetto necessario delle nostre facoltà di pensiero e d'immaginazione, conferiteci dalla natura; in questo caso avviene, come per parecchie altre verità, la cui conoscenza è stata conquistata attraverso un lavoro durato secoli, che esse, in seguito, quando entra in vigore la forza dell'abitudine, vengano presentate come ovvie ed innate. Perciò per la nostra giustificazione è necessario solo un rinvio allo sviluppo storico del principio, se vogliamo senz'altro respingere una tale affermazione^(v141).

Come in ogni dimostrazione di una proposizione delle scienze naturali si può parlare, anche per il nostro principio, di due metodi: **il procedimento deduttivo e quello induttivo.** Mentre il primo fa apparire la proposizione nella sua intera generalità come risultato logico della contemporanea esistenza di una serie di altre proposizioni, generalmente riconosciute vere, ottenute o dall'esperienza o da altre parti, il metodo induttivo, invece, parte dall'idea di provare, al vaglio dell'esperienza, i singoli corollari che discendono dalla proposizione da dimostrare, assumendola per il momento come valida e mettendola in relazione con altre sufficientemente provate. Se anche uno solo dei corollari appare non concorde con l'esperienza allora la proposizione è da respingere decisamente; se invece non è così, allora essa può rimanere; ma per via induttiva si può sempre raggiungere solo un certo grado di probabilità della verità di ciò che si vuol dimostrare, che aumenta nella misura in cui gli esperimenti vengono variati. Ciò nonostante viene sempre attribuito un valore particolarmente grande al metodo induttivo; giacchè la verità di tutta la nostra scienza della natura si basa in fin dei conti sull'esperienza, la fede nell'esattezza di una proposizione si radicherà tanto più solidamente nella nostra convinzione quanto più stretta sarà la relazione tra la proposizione ed un fatto direttamente constatabile attraverso l'esperienza. Perciò ogni volta che si tratta della verifica di un nuovo principio, cercheremo di affrontarlo da tutte le parti possibili sia con l'esperimento che con l'osservazione, e nessun fisico si accontenterà della semplice deduzione per una legge scientifica di una certa portata; egli consulerà, possibilmente, sempre la massima istanza: l'esperienza.

Se volgiamo, da questo punto di vista, lo sguardo sul principio trattato, ci basta dare un'occhiata alle applicazioni esposte nel capitolo precedente ed in quello successivo, delle quali nessuna contraddice l'esperienza, per farci apparire la totalità delle prove induttive, che si estendono su tutti i fenomeni della natura da noi conosciuti, come una potenza addirittura^(v142) imponente che interviene nel modo più deciso a favore della validità illimitata del principio. Significherebbe ripercorrere l'intera storia dello sviluppo del principio, se volessimo a questo punto tentare di gettare uno sguardo complessivo sui tipi diversi di dimostrazioni empiriche che nel corso del tempo sono state accumulate; quasi ogni nuova applicazione fornì anche una nuova prova, a partire dal calore di attrito che è determinato soltanto ed unicamente dal lavoro meccanico impiegato, indipendentemente dal materiale dei corpi che si strofinano, dalle loro velocità, temperature etc. fino ai fenomeni dell'induzione galvanica, generata dal movimento di un magnete, indipendentemente dalla natura del conduttore nel quale viene prodotta.

Eppure per quanto travolgentemente ci venga incontro il numero e l'importanza di queste prove induttive, nessuno dovrebbe essere un empirico così inveterato da non sentire la necessità di un'altra prova che, costruita su fondamenti deduttivi, faccia scaturire, da certe verità ancor più generali, il principio in tutto il suo ampio significato come un insieme unitario. Perchè anche se la moltitudine delle singole esperienze fatte sembra costringerci di necessità all'assunzione di questa legge, nessuno ci garantisce che non possa ancora una volta essere trovata una classe isolata di fatti, finora per un qualunque motivo trascurati, che non si adegui alle esigenze del principio. É certamente indiscutibile che la rassicurante e completa certezza, che la convinzione

della verità di una proposizione ci conferisce, non ce la possiamo procurare per via solamente induttiva, ma soltanto concependo contemporaneamente il principio, da un punto di vista superiore, come una unità completa. Come si potrebbe altrimenti pensare che, se non si fosse imposto in tutte le menti in modo chiaro e semplice proprio il riconoscimento di quell'unità immediata ottenibile solo per deduzione, l'idea della conservazione dell'energia mettesse radici contemporaneamente in modo straordinariamente veloce in molti posti e, dalle più diverse parti, stimolasse a nuove ricerche, in un tempo in cui all'infuori delle ricerche di Mayer e Colding, scarsamente considerate in ambienti più vasti, era disponibile solo un numero esiguo di esperimenti di Joule, nei quali quindi si poteva a malapena parlare di prove induttive. Per noi nasce ora la questione, in qual modo si possa giungere per deduzione alla formulazione del nostro principio, più precisamente, se ci sia mai una prova deduttiva che possa rivendicare il diritto ad importanza strettamente scientifica, come viene richiesto attualmente nella scienza della natura. Approfondiamo un po' di più questa questione. Poichè ogni deduzione logica presuppone una premessa d'ordine superiore generalmente riconosciuta come vera, la cui estensione non deve essere minore di quella della proposizione da dimostrare, la difficoltà principale nel nostro caso consisterà proprio nel trovare questa premessa superiore che da un lato goda di un riconoscimento così generale da poter servire da sicura garanzia della validità del nostro principio, e dall'altro sia così estesa da poter includere l'intero principio con la sua enorme portata. Si vede, fin dal primo sguardo, che la scelta tra proposizioni che soddisfano ad entrambe le esigenze non sarà grande; malgrado ciò sono degne di nota alcune di loro che nel corso dei tempi hanno rivendicato la posizione di premessa d'ordine superiore nelle argomentazioni deduttive.

La più antica deduzione risale nientemeno che fino alla persona del Creatore stesso, che nella sua eternità e immutabilità ha comunicato queste sue proprietà anche alla natura da Lui creata, e alle sue forze, da cui risulta che la "quantità di moto" totale, contenuta nel mondo ha un valore costante e indistruttibile in tutti i tempi.

Siccome questa considerazione proveniente da Descartes (cfr. pag. 8) tende palesemente a stabilire una legge generale della natura che regoli la somma delle forze operanti in natura, così come la quantità di materia esistente, allora essa può certamente essere messa in relazione col principio della conservazione dell'energia; ad ogni modo queste idee si potrebbero trasferire senz'altro anche alla forma attuale del nostro principio.

Sostanzialmente nella stessa forma di ragionamento, anche se da un punto di vista più modesto, si muove l'argomentazione che Colding (pag. 30 e seg.) cercò di addurre per la conservazione della forza. Egli veramente non fa più appello proprio alla suprema Istanza, bensì ravvisa il motivo dell'immutabilità delle forze di natura nel fatto che esse stesse, proprio perchè governano così perfettamente la natura, devono essere entità trascendenti e spirituali e come tali non possono essere soggette alla morte naturale o alla deperibilità. Egli però ritiene sempre opportuno verificare questa proposizione attraverso l'esperienza e imposta in questo senso i suoi esperimenti. Dato che, secondo le opinioni di oggi, ogni prova di una proposizione di scienze naturali, il cui significato abbia le radici su un terreno metafisico, ha perso a priori il suo vigore, possiamo sorvolare rapidamente su queste e simili deduzioni.

Una maggior considerazione merita già il modo di concepire le cose che Mayer (pag. 21 e seg.) pose in cima alle sue discussioni^(v143). Esso si appoggia invero ancora su fondamenta alquanto vacillanti, tuttavia non si può più certamente classificarlo come^(v143) metafisico. La sua proposizione principale: "Causa aequat effectum", la causa è pari all'effetto, viene da lui commentata come se in natura ogni causa producesse un proprio effetto particolare e viceversa: nell'effetto nulla è contenuto che non fosse già riposto nella causa (sotto una forma qualsiasi)^(v144). Tutte le variazioni che avvengono in natura perciò consistono non nella produzione ma solo nella trasformazione di forze secondo determinati, costanti, rapporti di misura; i diversi tipi

di forze sono equivalenti fra loro secondo certi rapporti determinati, esse possono, di conseguenza, venire misurate tutte in un sistema di misura comune e la somma di tutte le forze presenti nel mondo, espressa in questo sistema comune di misura, rimane costante nel tempo. Si può bene ammettere che questa deduzione ha qualcosa di affascinante poichè la legge di causa ed effetto costituisce proprio il postulato di tutta la nostra conoscenza della natura; tuttavia bisogna considerare d'altra parte che l'attrattiva che esercita su di noi la deduzione di Mayer perderebbe vigore in modo rilevante se noi non avessimo riconosciuto per altri motivi la verità della proposizione e se non ci fossimo abituati, con annoso esercizio, all'idea che essa esprime; essa potrebbe a malapena suscitare grande impressione su colui al quale questa questione fosse interamente nuova. Se perciò si potrà far valere a posteriori il ragionamento esposto come un'eccellente spiegazione del principio di conservazione, altrettanto dovrebbe essere negato decisamente allo stesso il rango di prova vincolante in senso fisico. Inoltre il significato di "aequat" è troppo indeterminato: se la causa fosse veramente uguale all'effetto, non ci sarebbe certamente alcuna variazione nella natura.

La prima deduzione effettivamente fisica, con la quale fu dimostrato il principio dell'energia in tutta la sua estensione, è quella che Helmholtz⁽ⁿ¹⁴⁾ ha dato nel suo trattato sulla conservazione della forza: essa si basa sulla concezione meccanica della natura, più particolarmente sul presupposto che tutte le forze operanti in natura si lasciano risolvere in forze puntuali, per le quali valgono gli assiomi di Newton. Questo presupposto è collegato o con l'assunto che tutte le forze elementari siano forze centrali, o con quello dell'impossibilità della costruzione di un perpetuum mobile. Riguardo all'esposizione di queste idee abbiamo già fatto conoscere l'essenziale nel capitolo precedente (pag. 35 e segg.). In questo senso il principio di conservazione dell'energia si ridurrebbe essenzialmente alla proposizione, di natura meccanica, della conservazione delle forze vive e dovremmo concepire l'intera energia del mondo come esistente solo in due forme: quella in atto (forza viva) e quella potenziale (forza di tensione). È facilmente spiegabile che proprio questa dimostrazione abbia ottenuto la preferenza sugli altri metodi deduttivi e che anche oggi si debba considerarla come la più frequentemente usata, se si considera che la concezione meccanica della natura svolse un ruolo significativo nella filosofia della natura già fin dall'antichità, molto prima del riconoscimento del principio dell'energia, soprattutto perchè corrisponde in modo così eccellente alla nostra esigenza di causalità, che tende quanto più è possibile verso l'unità delle forze che sono alla base dei fenomeni e se inoltre ci si rende conto di come la definizione del concetto di energia, la formulazione ed infine la dimostrazione del principio si rendono straordinariamente espressivi dal punto di vista meccanico. Dopo il precedente di Helmholtz essa fu adottata da altri fisici (Mayer come è noto non ha condiviso la concezione meccanica della natura) mentre, contemporaneamente, anche a partire dall'Inghilterra con Joule, al quale si associarono Rankine e Thomson, la concezione meccanica si divulgava e veniva fatta apprezzare.

Ciò malgrado mi sembrerebbe⁽ⁿ¹⁵⁾ di poter a maggior ragione addurre il principio della conservazione dell'energia a sostegno della concezione meccanica della natura che non, viceversa, porre quest'ultima a fondamento della deduzione del principio dell'energia, dato che questo principio ha fondamenti molto più sicuri che non la supposizione, pur così plausibile, che ogni variazione in natura sia da ricondurre al movimento. In numerosi casi decisivi si è dimostrato esatto il principio dell'energia mentre le ragioni che si possono portare a favore della teoria meccanica, per lo meno nella misura in cui esse si rifanno all'esperienza diretta, fanno ricorso in gran parte (non in modo esclusivo, cfr. la teoria dei gas) alla conservazione dell'energia dalla quale, del resto, non necessariamente discendono (cfr. pag. 51)^(v145). Invano ci si è finora sforzati di ricondurre a semplici movimenti la totalità dei fenomeni elettrici e magnetici, e nell'applicazione al mondo organico (al quale vogliamo e dobbiamo estendere la dimostrazione del principio della conservazione dell'energia)^(v146) non si è ancora evidenziata nemmeno la traccia di un inizio.

L'opinione, che viene talora avanzata, che la teoria meccanica debba essere accettata come un postulato a priori della ricerca fisica, deve essere invece respinta con grande decisione; essa non ci può liberare dall'obbligo di fondare quella teoria in modo legale. La scienza della natura conosce un solo postulato: il principio di causalità; infatti esso è la condizione per la sua esistenza. Non occorre qui indagare se questo principio è stato anch'esso attinto solo dall'esperienza o se costituisca una forma necessaria del nostro pensiero.

Mi sembra perciò di corrispondere meglio al carattere empirico, così splendidamente provato, della nostra moderna scienza della natura, considerando la concezione meccanica come l'obiettivo della ricerca raggiungibile nel modo più possibile e probabile, piuttosto che anticipare avventatamente un risultato non ancora stabilito in modo sicuro, per farne il punto di partenza della dimostrazione di una proposizione la cui validità generale sembra assicurata come per poche altre di tutta la scienza della natura. La grande importanza della concezione meccanica non è affatto sminuita da questa considerazione, essa ci indica la direzione verso cui dovrà muoversi la ricerca, poichè solo attraverso l'esperienza può essere decisa la questione sull'ammissibilità di questa teoria. Si utilizzeranno perciò tutti i mezzi a disposizione per applicare, fino alle estreme conseguenze, la concezione meccanica in tutti i campi della fisica, della chimica, etc., e in questo senso gli sforzi in questa direzione trovano la loro validità principale, tanto più che essi finora hanno già messo in luce brillanti risultati. C'è però ancora una grande differenza tra il considerare un'ipotesi come verosimile o il porla in vetta ad una deduzione, come quella di cui qui si tratta. Con la precauzione adottata ci cauteliamo contemporaneamente da delusioni sgradevoli. Infatti se si dovesse veramente fare la singolare esperienza che la nostra concezione spaziale e temporale non è sufficientemente generale per descrivere⁽¹⁵⁰⁾⁽ⁿ¹⁶⁾ la totalità dei fenomeni che ci offre la natura, non lasceremmo subito cadere per questo, come è avvenuto in casi analoghi, anche altre proposizioni ben fondate, ma saremmo facilmente in grado di separare l'essenziale dimostrato dall'inessenziale non dimostrato.

Dato che non possiamo deciderci, per le argomentazioni fatte, ad attribuire alla dimostrazione meccanica del principio della conservazione dell'energia quell'importanza di cui gode generalmente^(a9), ci assumiamo perciò a maggior ragione l'obbligo di cercare un'altra proposizione che sia più adatta, in quanto più solidamente fondata, a servire da punto di partenza della deduzione. Ora esiste infatti una tale proposizione che sembra possedere le qualità richieste in modo più soddisfacente: è la proposizione sperimentale che esprime l'impossibilità del perpetuum mobile e del suo inverso, e per di più in modo del tutto indipendente da ogni particolare concezione della natura. Con riferimento alla nostra precedente terminologia (pag. 99) possiamo formularla nel modo seguente: "É impossibile compiere con un sistema materiale un processo ciclico (che riporta il sistema esattamente nel suo stato iniziale) in modo che gli effetti esterni abbiano un valore di lavoro diverso da zero (positivo o negativo^(v148))" (sul concetto di valore di lavoro di un effetto esterno si veda a pag. 94 e seg.) o più brevemente "un valore di lavoro positivo non può nè nascere dal nulla nè svanire nel nulla"; il viceversa è presupposto essenziale.

Bisogna considerare che si è lavorato per secoli intorno alla fondazione di questa proposizione; ci furono infatti persone che non temettero di impegnare vita e beni per confutare le affermazioni di questa proposizione, attraverso la creazione di valore di lavoro dal nulla. Se infatti si vuol far valere una prova indiretta ottenuta sperimentalmente, questa è l'occasione buona, e allora non si troverà troppo alto neanche il prezzo al quale fu acquisita la verità di così gran valore per l'umanità. Sta di fatto comunque che al giorno d'oggi non si esita a dichiarare semplicemente stolto colui che si dedica alla costruzione di un perpetuum mobile.

Un po' più deboli invero stanno le cose per la dimostrazione della proposizione inversa, ossia che il valore di lavoro non può sparire nel nulla⁽ⁿ¹⁷⁾. Non si è trovato quasi mai qualcuno che si sia occupato praticamente del problema di distruggere

lavoro, come, tanto meno, di quello di trasformare oro in piombo. Non possiamo quindi parlare in senso pieno di una prova, fornita dall'esperienza, dell'impossibilità di soluzione di questo problema, come invece per la prima proposizione, ma ci dobbiamo limitare a constatare il fatto che non è stato ancora osservato un processo in cui non venga prodotto nient'altro se non la distruzione di valore di lavoro. Ci dobbiamo accontentare di questo dato di fatto al posto di una dimostrazione: infatti non si può parlare di deduzione della proposizione inversa da quella diretta, dato che non tutti i processi naturali si possono invertire. In senso logico non dovrebbe esserci nessuna contraddizione nell'ipotesi che il lavoro non può certamente nascere dal nulla, ma bensì in certe circostanze può svanire nel nulla (opinione di Clapeyron, pag. 16).

D'altronde bisogna ammettere che anche la prova sperimentale della proposizione diretta: l'impossibilità della produzione di lavoro dal nulla, è stata condotta su una parte relativamente molto limitata dell'intero campo delle forze naturali; infatti già oggi sono a noi noti e accessibili fenomeni molto più vari di allora, quando si mirava alla realizzazione pratica del perpetuum mobile. Al momento presente non si può facilmente giudicare fino a che punto sia corretto estendere le esperienze, raggiunte precedentemente in un ambito più ristretto, a tutti gli effetti nella natura, dato che poi, per la familiarità col principio dell'energia, siamo troppo abituati alla validità generale di questa verità, per poter provvisoriamente prescindere del tutto da essa.

Comunque sia: noi poniamo in cima alle successive argomentazioni la proposizione dell'impossibilità del perpetuum mobile e del suo inverso nell'ambito dell'intera natura organica ed inorganica, e vogliamo, del tutto indipendentemente dalla concezione meccanica della natura, esaminare se e a quali condizioni questa proposizione si possa utilizzare come prova del principio della conservazione dell'energia. Ricordiamoci in primo luogo dell'osservazione, fatta a pag. 99, che tutte le diverse forme del principio sono contenute nell'unica proposizione: "L'energia di un sistema materiale in uno stato determinato, riferito ad un determinato stato zero, possiede un valore univoco"; allora si tratterà qui soltanto di dedurre questa proposizione da quella dell'impossibilità del perpetuum mobile, precisamente prendendo per base la definizione che abbiamo stabilito (pag. 93) per il concetto di energia. Scegliamo il metodo indiretto di dimostrazione, mostrando che in ogni singolo caso, in cui risultassero dalla definizione due diversi valori dell'energia, sarebbe possibile la costruzione di un perpetuum mobile.

Ammettiamo allora che si sia portato il sistema naturale dallo stato A, dato, allo stato zero, N, in modo arbitrario e che si sia trovato il valore di lavoro degli effetti esterni pari ad a ; sia inoltre possibile anche un altro modo per il passaggio, e questo fornisca per gli effetti esterni un valore di lavoro a' diverso da a . Allora si potrà sempre costruire un perpetuum mobile, veramente non nel modo in cui lo si trova talvolta indicato, tale che il sistema venga portato nell'un modo allo stato N e poi, nell'altro modo, da questo di nuovo allo stato A; però non occorre che il processo considerato sia reversibile. Noi piuttosto una volta che il sistema sia giunto, nell'uno o nell'altro modo indicato, allo stato N, lo trasferiremo di nuovo allo stato A in un qualsiasi modo arbitrario e con ciò chiuderemo il processo ciclico. Se indichiamo con b il valore di lavoro degli effetti esterni che si manifestano nel ritorno da N ad A, allora abbiamo a disposizione due processi ciclici i cui rispettivi valori di lavoro corrispondono ad $(a + b)$ e $(a' + b)$. Siccome poi, secondo le ipotesi fatte, queste due grandezze sono diverse, almeno una di esse dovrà essere diversa da zero e con ciò sarebbe consentita la possibilità di un perpetuum mobile (o del suo contrario) ^(v149)

Come condizione essenziale per l'utilità di questa dimostrazione dobbiamo ammettere tuttavia il presupposto generale che sia sempre possibile, in un modo qualsiasi, il trasferimento di un sistema materiale da uno stato dato ad un altro qualsiasi; senza di questo l'intera deduzione è illusoria. Difatti: consideriamo per una volta gli effetti esterni che sono suscitati dalla trasformazione del diamante in carbonio

amorfo, quando questa viene prodotta una volta in modo chimico ed un'altra in modo fisico (galvanico)^(v150). Se questi effetti non dovessero avere lo stesso valore di lavoro meccanico, nessuno sarebbe in grado, nonostante ciò, di utilizzare questa circostanza per la costruzione di un perpetuum mobile, poichè non siamo in grado di ritrasformare carbonio in diamante e^(a10) quindi con ciò di chiudere il processo ciclico. Però credo che l'obiezione, che si potrebbe derivare da questa circostanza, contro la generale ammissibilità della deduzione data, non sia plausibile. Infatti non importa che l'abilità dell'uomo sia in grado di effettuare il passaggio da uno stato ad un altro a piacere, bensì che questo passaggio avvenga effettivamente in natura od anche solo che possa avvenire mediante un'opportuna interazione di forze della natura. Se non si volesse ammettere questa conclusione, ne conseguirebbe che la proposizione dell'impossibilità del perpetuum mobile, sia da far scaturire non da una legge di natura ma piuttosto da una carenza di abilità dell'uomo, il che certamente contrasta con l'essenza della proposizione. Secondo tutte le nostre esperienze la condizione citata è da ritenersi sempre soddisfatta; infatti la natura crea continuamente dagli elementi più semplici tutto ciò che offre, essa appronta con la stessa facilità, in modo per noi talvolta del tutto sconosciuto, le sostanze inorganiche e gli organismi più complicati e li scompone poi di nuovo nelle loro parti componenti. Con lo stesso intendimento abbiamo già discusso la medesima questione in un'occasione precedente (pag. 98).

Crediamo perciò di non andare errati quando (in antitesi con la trasformazione limitata delle forme di energia) presupponiamo come illimitata la trasformabilità della materia da tutti gli stati possibili in tutti gli altri possibili (se gli elementi chimici si conservano)^(v151) e con ciò è assicurata la deduzione della proposizione della conservazione dell'energia, con tutte le sue conseguenze, dal principio del perpetuum mobile. Difatti non esitiamo ad assegnare a questa dimostrazione il posto più di riguardo tra i metodi deduttivi; con ciò non è del tutto escluso che, giunta la scienza della natura ad un livello di sviluppo più elevato, verrà posta a base della deduzione, con miglior diritto, un'altra proposizione sperimentale, magari la concezione meccanica della natura.