

BIOECONOMIA E DEGRADAZIONE DELLA MATERIA. IL DESTINO PROMETEICO DELLA TECNOLOGIA UMANA

di

NICHOLAS GEORGESCU-ROEGEN

Lo studio della termodinamica

Ci si spiega facilmente perché gli uomini sono arrivati per caso a capire alcuni fatti migliaia di anni fa, prima che questi casi divenissero oggetto della scienza e ricevessero anche una spiegazione scientifica. La gente ha utilizzato il lievito per fare il pane, ha fatto la birra e ha fatto il vino senza avere idea di ciò che comportavano queste fermentazioni. La scoperta della causa delle fermentazioni ha dovuto attendere il microscopio e la perspicacia di Luigi Pasteur.

Gli uomini conoscono ugualmente da tempi immemorabili il fatto che il calore passa sempre dal corpo più caldo al corpo più freddo, mai in senso inverso. Fu sempre la mano di colui che ha toccato una padella molto calda ad essere bruciata, mai la padella. Ma fu solamente a partire dalla metà del secolo scorso che questa semplice verità, una delle più incontestabili che esistano, è stata incorporata nella scienza nascente della termodinamica, dove è servita dapprima come il suo principale sostegno caratteristico: la legge dell'entropia sotto la forma che le ha data per la prima volta Rudolf Clausius (1).

Questo ritardo è certamente curioso. Cominciando da Eudosso, molto prima di Tolomeo, tutti gli scienziati si sono preoccupati soprattutto dei corpi celesti, come testimonia uno dei capolavori di Laplace, *Trattato della meccanica celeste*, pubblicato in cinque volumi all'inizio del secolo scorso. Fu il genio di Sadi Carnot che interruppe questa vecchia tradizione, orientando, seppure con una certa scadenza, l'interesse della scienza verso problemi vicini alla terra, problemi riguardanti direttamente la vita della specie umana. Infatti, nella sua famosa memoria, Sadi Carnot si è proposto di studiare le condizioni in cui il rendimento di una macchina a fuoco è al massimo. La scienza della termodinamica, che si è sviluppata a partire da questa memoria, non è in fondo che la fisica del valore economico, ed essa è restata tale a dispetto delle ulteriori estensioni. Incontestabilmente Sadi Carnot fu il primo vero econometrico (Georgescu-Roegen, 1973, p. 111). E' quindi con ragione che si può parlare di

una riduzione carnotiana come ha fatto in un ammirevole prospetto Giacomo Grinevald (1976).

Poiché la termodinamica è cominciata con lo studio delle macchine a vapore, essa è rimasta a lungo la "scienza che studia principalmente le trasformazioni del calore in lavoro meccanico e le trasformazioni inverse del lavoro meccanico in calore", come spiegava Enrico Fermi nelle sue lezioni nel 1936 presso l'Università di Columbia. Ma a poco a poco la dinamica del calore è stata conglobata con le altre forme di energia macroscopica, divenendo anche la scienza che W. Macquorn Rankine (1855) aveva considerato inizialmente sotto il nome di "energetica", termine molto più appropriato alla situazione attuale (Duhem, 1897).

I discorsi precedenti hanno un preciso obiettivo, cioè sottolineare il fatto che la termodinamica tradizionale ignora completamente le trasformazioni irrevocabili subite dalla materia di cui è composto ogni convertitore di energia. Infatti anche la vita non può esistere senza una impalcatura materiale capace di sostenere le sue trasformazioni energetiche. Il fatto incontestabile è che nel mondo macroscopico anche la materia subisce trasformazioni qualitative irreversibili. E' una verità molto semplice e molto evidente il passaggio inevitabile del calore dal corpo caldo al corpo freddo.

Anche i nostri più primitivi antenati si sono dovuti accorgere che un martello di pietra non dura indefinitamente. Nella macchina che serve da base a quasi tutte le dimostrazioni delle formule termodinamiche, né il pistone, né il cilindro, neppure il gas che la riempie restano immutabili. Se la termodinamica menziona l'ubiquità della frizione è solamente per spiegare perché in realtà nessun motore può trasformare tutta l'energia libera in lavoro meccanico utile. Il problema di ciò che la frizione o le altre "imperfezioni" della materia causano alla materia stessa è una questione che è rinviata, sembra, a carico degli ingegneri.

Ma neppure gli ingegneri hanno molto progredito in questa direzione. La spiegazione si trova probabilmente nel fatto che la frizione, così come altre cause di deterioramento materiale, sono fenomeni piuttosto ostici - lo testimonia Richard P. Feynman (1966) ed Ernest Rabinowicz (1965), citati in Georgescu-Roegen, 1982, p. 95.

Evidentemente ogni scienza particolare è libera di scegliere il proprio settore di ricerca. Non è d'altra parte vero che il problema delle inevitabili trasformazioni della materia macroscopica è rimasto praticamente un «no man's land». Ci sono stati due contributi tendenti ad introdurre la materia nell'impalcatura della termodinamica. A proposito della prima si può dire che essa ha cercato di estendere l'idea della diffusione del calore nel caso della miscela libera dei gas. In effetti, la libera diffusione del calore dal corpo più caldo al

corpo più freddo è la causa della tendenza inevitabile verso l'equilibrio termodinamico e, per conseguenza, della crescita dell'entropia di tutto il sistema isolato contenente un insieme di corpi in contatto termodinamico. Ci si è domandato se ciò accade quando due o più gas in contatto diretto si diffondono a vicenda liberamente. La risposta è stata che l'entropia di miscela aumenta anche in questo caso (2).

Reversibilità e irreversibilità

Il secondo svolgimento rappresenta una data più importante nella storia della termodinamica. E' la scuola di Bruxelles, ispirata a Ilya Prigogine, che è andato al di là della termodinamica classica, la quale si limitava allo studio dei sistemi "chiusi" (cioè dei sistemi che non potevano scambiare che energia sotto ogni forma con l'esterno). Il volume di Ilya Prigogine, *Studio termodinamico dei fenomeni irreversibili*, pubblicato nel 1947, ha segnato l'inizio di un nuovo campo per la scienza termodinamica: lo studio dei sistemi aperti (cioè dei sistemi che possono scambiare energia e materia con l'esterno). Tuttavia le ricerche stimolate da questa nuova prospettiva non sono arrivate a riconoscere che la materia come l'energia è sottomessa ad una degradazione entropica continua e irrevocabile. Infatti, secondo la nuova termodinamica, concepita dalla scuola di Bruxelles, la materia entra in considerazione solamente come un veicolo per il trasporto dell'energia, un mezzo in più, differente da quelli considerati dall'edificio classico. La formula fondamentale classica è:

$$dU = dQ + pdV$$

dove l'energia interna U può variare solamente perché il sistema (chiuso) può scambiare calore, Q , o molto lavoro pdV , con l'esterno. Prigogine ha semplicemente sostituito questa formula con:

$$dU = d\varnothing + pdV$$

dove \varnothing rappresenta ora il trasferimento di energia risultante dal trasferimento di calore e dallo scambio di materia (Prigogine, 1967).

\varnothing differisce da Q , per esempio, nel caso in cui in una camera isolata si introduce un pezzo di metallo arroventato o una sostanza chimica a reazione esotermica (3).

Io noto che nessuna scienza particolare potrebbe essere biasimata di non estendere il suo studio al di là del suo dominio tradizionale.

Ma il caso della termodinamica è del tutto unico poiché (a dispetto delle antinomie che essa ha generato in rapporto alla rappresentazione meccanica) la legge dell'entropia è da lungo tempo riconosciuta come la legge suprema

dell'evoluzione di ogni realtà. Sir Arthur Eddington (1958) lo proclamava nelle sue *Gifford Conferences* del 1927: "La legge secondo la quale l'entropia aumenta sempre - la seconda legge della termodinamica - occupa, credo, la posizione suprema tra le leggi della natura. Se si scopre che una delle vostre teorie è in contraddizione con la seconda legge della termodinamica - io non vi posso offrire alcun supporto; non vi resta che sprofondare nella più profonda umiliazione".

E più recentemente Albert Einstein (1951) ne ha convenuto senza riserve: "Una teoria è tanto più impressionante quanto le sue premesse sono più semplici, quanto le categorie delle cose che essa rapporta le une alle altre sono più differenti e quanto il suo dominio di applicazione è più vasto. E' la ragione della profonda impressione che la termodinamica mi ha fatto. La termodinamica è la scienza naturale di portata universale a proposito della quale io sono convinto che nel campo dell'applicabilità delle sue concezioni di base essa non sarà mai rifiutata" (4).

Ma d'altra parte la famosa proclamazione di Rudolf Clausius - "L'entropia dell'universo tende continuamente verso un massimo" - non rappresenta che una vista parziale della realtà, sapendo che essa non concerne che la degradazione dell'energia. Questa parzialità ha causato degli effetti spiacevoli. Poiché la termodinamica tradizionale non menziona in alcuna maniera la degradazione entropica della materia, essa ha creato l'impressione che la materia non si degradi. La letteratura di base, infatti, lascia il lettore con l'impressione che ogni convertitore materiale duri indefinitamente senza la più piccola usura. Ciò spiega perché Kenneth Boulding (1966) ha potuto sostenere che "non vi è legge di accrescimento dell'entropia per la materia".

Non essendo Boulding un esperto in scienze della natura si può passare oltre questa affermazione. Ma ciò che non si può ignorare è il fatto che questa forma moderna dell'energetica è propagata da numerosi fisici e chimici (5).

La tesi è stata chiaramente espressa da Harrison Brown e dai suoi collaboratori (1957) in un'opera ormai classica: "Tutto ciò che ci occorre per ottenere qualunque tipo di materiale che desideriamo, è aggiungere sufficiente energia al sistema". E' chiaro che questi autori non hanno guardato ad un sistema aperto in confronto ad un ambiente abbondante, perché in questo caso l'enunciato sarebbe del tutto volgare. Di fatto essi hanno aggiunto immediatamente che in principio il riciclaggio può essere completo, un'idea che costituisce il più caratteristico corollario del dogma energetico moderno. Infine dei conti è Glenn Seaborg (1972) che ha precisato le conseguenze ultime di questo dogma.

Secondo lui la scienza arriverà ad eliminare tutte le difficoltà tecniche in modo che con una abbondanza di energia noi saremo in condizioni "di ricicla-

re quasi tutti i residui ... di estrarre, di trasportare e di restituire alla natura tutti i materiali, in una forma accettabile, in un montante accettabile e in un proprio posto, così che l'ambiente fisico resterà naturale e sopporterà la crescita e lo sviluppo continuo di tutte le forme di vita".

Il dogma energetico

Il dogma energetico ha fatto nascere altri sviluppi fallaci, che sono particolarmente dannosi per un mondo che oggi prova difficoltà economiche e demografiche (pertanto politiche) senza precedenti. E' soprattutto perché l'origine di queste difficoltà è in grande misura provocata dalla crisi dell'energia che questi sviluppi sono presentati come salutari a questo riguardo (io ne parlerò più brevemente più avanti).

Nei miei primi lavori sulla relazione tra il processo economico e la legge della termodinamica, ho affermato semplicemente "che noi non possiamo utilizzare una quantità data di bassa entropia che una sola volta" (Georgescu-Roegen, 1966, 1971, 1973). A quell'epoca non potevo immaginare che la scienza potesse sostenere il contrario per ciò che concerne la materia. E' per questo che non ho fatto sforzi per denunciare il dogma energetico che dopo averne preso conoscenza molto più tardi (6).

E' stato solamente dopo ciò che mi sono messo a raccogliere tutti i dati a mia disposizione per verificare la validità di questo dogma (Georgescu-Roegen, 1977, 1980, 1982). Certamente, niente ci permette di supporre che anche il dogma energetico possa negare che gli oggetti materiali di ogni tipo si usano continuamente e inevitabilmente. A poco a poco le particelle di ogni pezzo di materia si staccano e si disperdono ai quattro venti. Ma ciò che caratterizza il dogma energetico è l'idea che con energia sufficiente si possano, per esempio, raccogliere tutte le parti di caucciù disperse per la frizione dei pneumatici sulle strade e anche rigenerare i pneumatici usati.

Curiosamente nessun adepto del dogma energetico ha trovato necessario spiegare, almeno a grandi linee, come tale operazione potrebbe essere effettuata. In una tale situazione dobbiamo vedere quali potrebbero essere i punti di appoggio plausibili di questa dottrina, enunciata solamente d'autorità. Un'idea che ci viene in mente naturalmente è di considerare l'equivalenza tra la massa e l'energia: $E = m \cdot c^2$. Dopo Hannes Alfvén (1969), tra gli altri, ne deriva che "la materia può dunque essere guardata come una fonte di energia. Questa conclusione, oggi molto popolare, sfortunatamente confonde la massa - una proprietà della materia- e la materia.

Il ragionamento adottato da Alfvén si disprezza nell'asimmetria essenziale tra la materia e l'energia. Se nel mondo macroscopico tra la materia e l'energia non ci fosse nessuna differenza fenomenale non ci sarebbe nessuna ragione di distinguere i sistemi chiusi e i sistemi aperti e di conseguenza di attribuire un qualsiasi valore alla termodinamica dei sistemi irreversibili sviluppati da Prigogine (7).

Energia e massa

L'osservazione che l'energia pura può trasformarsi in massa non porta niente di nuovo al dogma energetico. Certamente un fotone, che non ha massa, può far nascere delle particelle aventi una massa. Ma queste particelle nascono sempre in coppie perfettamente simmetriche e antagonistiche: ogni coppia consiste in una particella di materia (come quella che ci circonda) e una particella dello stesso tipo di antimateria. Le due si distruggono reciprocamente al loro emergere. Inoltre poiché dei fotoni danno origine su grande scala alle coppie di fotoni e di antifotoni, è necessaria una temperatura superiore a quella che esiste nelle stelle più calde (S. Weinberg, 1979).

In una tale circostanza tutto si riduce al plasma dove gli oggetti materiali non possono esistere nella forma richiesta dall'esecuzione del lavoro meccanico: non c'è dunque mezzo di ottenere di più dal lavoro meccanico.

Immaginiamoci che una collana si rompa e che le sue perle si spandano in una stanza. Si potrebbero certamente raccogliere tutte in un lasso di tempo relativamente breve se si è sufficientemente pazienti. Ma se si rompe in qualche parte di Roma durante la visita alla città, la stessa operazione è quasi impossibile. Non solo ciò prenderà un tempo quasi infinito, ma in più un certo numero di oggetti dovranno essere utilizzati a questo fine e questi si useranno a loro turno e conseguentemente dovranno essere ricostituiti se si vuole che il riciclaggio sia completo.

Noi ci troviamo anche qui di fronte ad una regressione senza fine della stessa natura di quella che si oppone, nella termodinamica tradizionale, alla reversibilità completa di un sistema di energia reale. A questo proposito si deve osservare che l'infinità del tempo è strettamente associata alla fondazione di questa termodinamica classica, dove si suppone che tutti i movimenti si fanno con una andatura incredibilmente lenta affinché tutti gli effetti della frizione siano eliminati. Un movimento dato, per quanto piccolo sia, prende dunque un tempo infinito.

Il solo fine delle ultime annotazioni è di delucidare un aspetto importante del problema. Come si sa perfettamente nei nostri giorni noi non abbiamo il

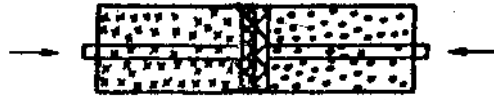
diritto di estrapolare dal macrocosmo al microcosmo, né nel senso inverso. Ci possono essere altri mezzi per ricostruire un oggetto usato di quelli elencati nell'esempio della collana rotta. In effetti si trova un tale mezzo nella letteratura tradizionale: è la scatola di reazione concepita da J. H. Van't Hoff (il primo premio Nobel per la chimica). Questa scatola è composta di un cilindro isolato adiabaticamente e da due pistoni che si oppongono (fig. 1). Ogni pistone si compone di una membrana semi permeabile, una impermeabile al gas a, l'altra al gas b. All'inizio il cilindro contiene un miscuglio in uguale quantità di questi due gas e i pistoni si trovano nella posizione indicata dalla figura 1 a. Se si spingono lentamente i pistoni sino a che si incontrino al centro del cilindro, per effetto delle proprietà delle membrane semi permeabili, i due gas saranno completamente separati ciascuno dietro la membrana che l'altro non può superare (fig. 1 b).

Questo modello è splendido come quello del ciclo ideale di Carnot ma ben lontano dalla realtà fenomenologica. Non è sorprendente che solo Max Plank (1913) ha attirato l'attenzione sul fatto che in realtà non ci sono membrane semi permeabili perfette, come non esistono strutture materiali perfettamente flessibili, perfettamente indeformabili, perfettamente isolanti, perfettamente conduttrici e via dicendo. In secondo luogo egli ha notato che le membrane semi permeabili si ostruiscono gradualmente e irrevocabilmente con l'uso (8). Infine, in seguito a considerazioni più tecniche, Plank ha concluso "che non si può mai purificare un gas, un liquido e un solido di sostanze contaminanti", un principio che benché di un'importanza capitale non ha nessun'eco nell'ulteriore termodinamica.

Fig. 1



(a)



(b)

Se si calcola il lavoro meccanico necessario per spingere i pistoni dalla loro posizione iniziale fino al loro contatto, si trova che questo lavoro è uguale al prodotto della temperatura T con un'espressione stabilita da Lord Rayleigh e J. Willard Gibbs:

$$\Delta S_M = -R [N_1 \text{Ln} (N_1 / N) + N_2 \text{Ln} (N_2 / N)]$$

dove N_1 , N_2 , $N + N_1 = N_2$ sono i numeri di moli di gas e R è la costante dei gas perfetti. Sulla base di questo semplice mezzo (ce ne sono altri) l'espressione è stata identificata con la crescita dell'entropia dovuta, non ad un trasferimento del calore tra il compartimento di un sistema isolato, ma ad una diffusione dei gas all'interno di un sistema adiabatico.

In relazione alla scatola di Van't Hoff e alla formula Rayleigh - Gibbs noi non dobbiamo perdere di vista i due punti seguenti. Per primo, seppure la scatola di Van't Hoff non provi che il riciclaggio completo sia possibile in realtà, essa descrive almeno una ricetta pratica per separare un miscuglio gassoso, come il ciclo di Otto, per esempio, è la idealizzazione del motore a combustione interna. Secondariamente il fatto che non è sufficientemente sottolineato è che non ci sono ricette simili per gli altri miscugli, di liquidi o di solidi. In pratica la separazione di questi miscugli si ottiene attraverso ricette adattate alle proprietà chimiche e fisiche delle sostanze mescolate (9). Il significato teorico del modello di Van't Hoff è dunque lontano dall'essere così generale come lo si suppone ordinariamente.

Ricordiamoci che l'entropia può anche essere definita come il rapporto tra il lavoro meccanico necessario per riportare un sistema al suo stato iniziale e la temperatura del sistema. E' questa definizione che giustifica la formula dell'entropia di mescolanza. Ma generalmente ci si dimentica che il calcolo del lavoro meccanico, nel caso della formula sopra riportata è limitato ai miscugli di gas perfetti. La formula non si può applicare anche in teoria pura alle mescolanze di liquidi o solidi.

Non c'è alcuna giustificazione per sostenere che il prodotto $T \Delta S_M$ rappresenta il lavoro necessario per separare diciamo il rame da un altro minerale. Il fatale difetto dell'edificio eretto sulla formula è che questa dà lo stesso risultato per i miscugli simmetrici, per un minerale che contiene, mettiamo, l'88 % di rame e per quelli che ne contengono solamente il 12 %. E' pertanto elementare che, in realtà, il lavoro di separazione non può essere lo stesso nei due casi (Georgescu-Roegen, 1982).

Da qualunque punto di vista si esamini il dogma energetico, il risultato è che questo dogma è sprovvisto di ogni fondamento. Ne consegue che il principio contrario deve essere vero.

La quarta legge della termodinamica

Quest'altro principio costituisce una nuova legge che io ho chiamato la quarta legge della termodinamica (Georgescu-Roegen, 1977, 1978, 1980). Sull'esempio della legge tradizionale dell'entropia, questa ultima legge è legata alla distinzione tra materia *utilizzabile* (cioè in uno stato tale che noi possiamo utilizzarla nella manipolazione fisico chimica) e materia *non utilizzabile* (rappresentata dalle particelle di materia che si trovano disperse o senza possibilità di essere riunite in materia utilizzabile). A proposito di queste ultime particelle, si può riprendere ciò che Lord Kelvin (1851) diceva dell'energia dispersa sotto forma di calore: queste particelle sono irrevocabilmente perdute per noi, quindi sciupate, ma non annientate.

Una formulazione della quarta legge è la seguente: *In ogni sistema chiuso la materia utilizzabile si degrada irrevocabilmente in materia non utilizzabile.*

Ma la legge si può esprimere in un altro modo: *Il movimento perpetuo di terza specie è impossibile.*

Per movimento perpetuo di terza specie io intendo un sistema chiuso, che produce indefinitamente lavoro meccanico a un tasso che non tende in media verso zero (10).

Il punto di vista adottato nella presente analisi della degradazione irrevocabile della materia conduce ad una dualità di leggi concernenti da un lato l'energia, dall'altro la materia.

Per l'energia noi abbiamo:

1. nessun lavoro meccanico si può ottenere senza spesa di energia;
2. nessun lavoro può essere ottenuto in realtà senza che una quantità di energia utilizzabile non sia sprecata in energia inutilizzabile;

3. nessun sistema reale può essere completamente purificato da energia non utilizzabile (11).

Per la materia noi abbiamo:

1. nessun lavoro può essere fatto senza utilizzare la materia;
2. nessun lavoro si può ottenere senza che qualche materia utilizzabile non si degradi in materia non utilizzabile;
3. nessuna sostanza può essere completamente purificata dai suoi elementi contaminanti (12).

A questo punto si presenta allo spirito del ricercatore curioso una questione a conclusione dell'argomento sviluppato in queste pagine. Poiché la materia, quanto l'energia, è sottoposta alla degradazione entropica, dovrebbe esserci una formula generale per l'energia della materia analoga a quella che si applica all'energia. Attualmente l'accertamento di una simile formula sembra al di fuori di ogni possibilità. L'ostacolo è la differenza fondamentale tra l'energia e la materia. L'energia è una "sostanza" omogenea che può sempre essere convertita da una forma in un'altra. Per esempio l'elettricità può trasformarsi in calore, il calore in lavoro, il lavoro in calore e così di seguito. La materia macroscopica, al contrario è profondamente eterogenea, ogni elemento, ogni sostanza ha il suo proprio carattere. E' precisamente per questa ragione che non si è potuto immaginare un apparecchio simile alla scatola a reazione applicabile a tutti i miscugli di materia.

Le conseguenze dei risultati precedenti per la chimica, o per l'ingegneria, potrebbero risultare piuttosto marginali. Ma la termodinamica come l'ha concepita Carnot è stata intimamente legata ad un problema economico (Georgescu-Roegen, 1973, 1982). La quarta legge: la sua importanza è capitale per la questione eminentemente pratica della relazione del processo economico con l'ambiente naturale fisico. Qui più che altrove si vede l'esattezza del vecchio consiglio di Walter Nernst (1922): "Le considerazioni termodinamiche devono essere utilizzate, non nei processi ciclici fittizi, ma nei processi che sono possibili nella natura, se queste considerazioni aspirano al rango di prove scientifiche invece di restare al livello di speculazioni arbitrarie".

Nel modello semplificato ma del tutto adeguato per il mio argomento, la relazione completa tra l'aspetto materiale del processo economico e l'ambiente naturale fisico è rappresentata dalla materia della tavola I. Ogni colonna rappresenta l'incasso di un processo parziale. Ogni incasso contiene due specie di coordinate. Una rappresenta i flussi che sono trasformati qualitativamente dagli agenti (i fattori classici di produzione: gli operai, le attrezzature e la terra nella concezione ricardiana).

L'altra comprende questi ultimi fattori, cioè i *fondi* (fondi capitali) del processo (13). Ogni ricetta rappresenta un processo stazionario continuamente riproducibile a condizione che i fattori che lo mantengono siano forniti in quantità sufficienti. Si suppone anche che ogni ricetta della tavola I sia *fattibile*. Come esempio di ricette fattibili si possono citare quelle di fare il pane, per convertire il calore in movimento o per inviare un uomo sulla luna. La ricetta per controllare l'energia termonucleare o per eliminare il cancro con la vaccinazione, al contrario, non sono fattibili (oggi).

I cinque processi della Tavola I operano come segue:

P_0 trasforma l'energia *in situ*, ES, in energia "controllata", E;

P_1 trasforma la materia *in situ*, MS, in materia raffinata, M;

P_2 produce un bene generale (capitale e bene di consumo), B;

P_3 trasforma i rifiuti riciclabili, DR, in materia riciclata MR;

P_4 sostiene la popolazione, H.

Tavola I

La relazione completa tra il processo economico e l'ambiente naturale fisico

ELEMENTI	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4
FLUSSI					
E	X_{00}	$-X_{01}$	$-X_{02}$	$-X_{03}$	$-X_{04}$
M	*	X_{11}	$-X_{12}$	$-X_{13}$	*
B	$-X_{20}$	$-X_{21}$	X_{22}	$-X_{23}$	$-X_{24}$
MR	*	*	$-X_{32}$	X_{33}	*
DR	W_0	W_1	W_2	$-W_3$	W_4
ES	$-e$	*	*	*	*
MS	*	$-m$	*	*	*
ED	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4
MD	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4
R	r_0	r_1	r_2	r_3	r_4

FONDI

INDIVIDUI	H ₀	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄
ATTREZZATURE	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
TERRA	L ₀	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄

Ogni processo rinvia nell'ambiente naturale energia non utilizzabile dispersa, ED, materia sciupata, MD, e scarto, R. Quest'ultimo contiene ancora energia e materia utilizzabili, ma che non si possono utilizzare nell'attività economica; R può contenere, per esempio, rifiuti nucleari, o rocce frantumate nelle operazioni minerarie di superficie.

Abbiamo visto che una ricetta può essere fattibile oppure no. Se per tecnologia noi intendiamo un insieme completo di ricette, come quelle della Tavola 1, è necessario introdurre un'altra distinzione, tra tecnologie in via di sviluppo o no. Ci sono due condizioni (necessarie o sufficienti) perché una tecnologia sia in via di sviluppo (durevole).

E' necessario per prima cosa che: $X_{4i} \geq X_4^{\circ} i'$

dove $X_4 i'$ rappresenta il minimo di esistenza per la popolazione H (14).

La seconda condizione si riduce alla uguaglianza:

$$\sum_i X_{ki} = X_{kk}, (k = 0,1,2,3) \text{ et } \sum_j w_j = w_3$$

Il processo economico è evidentemente aperto. Ma poiché la terra è un sistema praticamente chiuso, non è escluso che in avvenire alcuni materiali possano diventare un fattore più critico dell'energia. Il sole come sorgente di energia durerà ancora almeno quattro miliardi di anni, più a lungo della più ottimistica durata della specie umana. Alcuni autori, tra tutti quelli, innumerevoli, che parlano oggi lungamente sulla energia sostengono che "l'idea di un possibile esaurirsi della materia è ridicola. L'intero pianeta è composto di minerali" (Brooks e Andrews, 1974). Questa affermazione ignora che il pianeta non è completamente composto di materiali utilizzabili. E' la quarta legge della termodinamica che ne rileva l'assurdità. Certamente lo stock terrestre di palladio, per esempio, è praticamente costante, ma lo stock di palladio utilizzabile decresce (15).

La tesi secondo la quale lo stato stazionario costituisce la nostra salvezza economica, così brillantemente sostenuta di Herman Daly (1973) urta anche contro la quarta legge. La sua grande popolarità nei paesi occidentali è soprattutto dovuta al fatto che la gente dei paesi sviluppati, che presentemente si

sentono minacciati dalla crisi dell'energia, desidererebbero mantenere per sempre il loro attuale livello di vita (16).

L'analisi energetica

La presente crisi ha anche ampliato l'interesse per il dogma energetico sul quale si basa una nuova contabilità, l'analisi energetica (*energy analysis*). Questa analisi si propone di trovare tante unità di energia E (nel caso dell'analisi dell'energia netta) o unità di energia ES (nel caso dell'analisi dell'energia grezza) che devono essere dispensati per produrre un'unità di prodotto finale, per esempio, una bottiglia di birra o una barca. Naturalmente questa nuova disciplina ignora - forse nega - che per ottenere un certo prodotto è necessario anche sfruttare una certa quantità di materia utilizzabile *in situ*. Questa osservazione rivela d'altronde l'aspetto caratteristico del dramma economico. Da un lato in effetti ogni tecnologia deve essere sostenuta continuamente da flussi di energia ES e di materia MS . Dall'altro non c'è relazione $F(e, m) = \text{cost.}$ valevole per il macrocosmo. La scelta tra due tecnologie equivalenti ma tali che $e_1 > e_2$ e $m_1 < m_2$ non è dunque guidata da nessun criterio fisico-chimico. Nella maggior parte dei casi questa scelta è di natura puramente economica e, in una grande misura, possiede l'essenza di un vero dramma.

Inoltre l'analisi energetica urta contro una difficoltà pratica insormontabile. A causa del groviglio interno dei flussi, non è possibile ottenere il costo in energie di un prodotto senza calcolare nello stesso tempo il medesimo costo per tutti i prodotti (Georgescu-Roegen, 1980, 1982). Ciò implica la risoluzione di un problema lineare dove ci sono tante incognite quanti prodotti. E poiché in questo caso la classificazione deve essere molto sottile, raccogliere i dati tecnici e risolvere poi questo sistema gigante è un compito irrealizzabile attualmente e probabilmente anche in un lontano futuro.

Ma la più assurda escrescenza di questa strozzatura per tutto quello che interessa l'energia è l'idea di una nuova dottrina del valore economico. Questa dottrina che si può chiamare "economia politica energetica" sostiene che ogni valore economico è proporzionato alla quantità di energia "incorporata" nel bene in questione, essendo determinato questo "valore energetico" dall'analisi energetica di cui abbiamo parlato. In altre parole, in qualsiasi modo impiegate il vostro danaro sia per caviale, patate, un posto all'opera, per ogni lira voi otterrete lo stesso numero di calorie incorporate (Georgescu-Roegen, 1982). A ben dire ogni tentativo di impegnarsi su questa strada avrebbe dovuto essere annullato al suo nascere secondo quanto dice Friedrich Engels (1868) in una nota del 1875 inserita nella *Dialettica della natura*: "che si trasformi qualsiasi

lavoro qualificato in chilogrammo e che si cerchi di determinare su questa base!" (17).

Nessuno, senza dubbio, potrebbe stilare la lista di tutte le innovazioni che hanno marcato il progresso tecnico dell'umanità dal martello di pietra al razzo interplanetario solamente in alcune migliaia di anni, tanto queste innovazioni sono numerose. Per buona ragione esse costituiscono la fierezza della nostra specie. Certamente vi sono altre specie biologiche che impiegano utensili, i castori, per esempio. Ce ne sono altre come i *Cactospiza pallida* (un uccello delle Galapagos). Ma solo la specie umana è divenuta capace di utilizzare utensili per produrre utensili.

Tuttavia travisando tutte queste splendide realizzazioni si possono non distinguere facilmente gli alberi che compongono la foresta. Per comprendere la vera natura della presente crisi dell'energia ed essere in grado di immaginare il suo sviluppo più probabile, è necessario scartare le innovazioni abbaglianti ma sussidiarie, per scoprire quelle che hanno rappresentato un reale progresso tecnico. Per sorprendente che possa apparire, in ogni nostra evoluzione tecnologica non ci sono state che due innovazioni veramente cruciali (Georgescu-Roegen 1982, p. 131 e ss.).

Cronologicamente la prima è stata il dominio del fuoco e la sua utilizzazione per gli scopi più vari. L'importanza di questa scoperta deriva da due singolari proprietà del fuoco. Dapprima il fuoco rappresenta una conversione *qualitativa* dell'energia, la conversione di una certa forma di *energia chimica* in *energia calorifica*. Inoltre il fuoco procede come una reazione a catena: con una sola piccola fiamma si può fare bruciare un'intera foresta, anzi tutte le foreste. Il fuoco ha messo gli uomini in condizione di scaldarsi e di cuocere gli alimenti, ma soprattutto di fondere e di forgiare metalli, di far cuocere la ceramica e la pietra e la calcina. Gli antichi Greci avevano potenti ragioni nell'attribuire il dono del fuoco a Prometeo, semidio, non un semplice mortale.

Prometeo I e Prometeo II

L'era tecnologica aperta dal dono di Prometeo I, come noi dovremmo chiamarlo, è stata *l'età del legno*. In effetti, per secoli, il legno è stata l'unica fonte di energia calorifica efficace. Con il tempo il dono di Prometeo I contribuì alla sua propria estinzione. In effetti il nodo di tutto il dono di Prometeo è l'accelerare lo sviluppo tecnico, che a sua volta contribuisce all'estinguimento crescente del "combustibile" che lo contiene. Così con lo sviluppo industriale sempre crescente, le foreste del mondo occidentale cominciarono a sparire a

grandi passi. Durante la seconda metà del secolo XVII, l'aumento della crisi obbligò i governi, in Gran Bretagna e anche nel continente, a sottoporre l'abbattimento del legno nelle foreste a severe restrizioni. La crisi di allora era in tutti i riguardi analoga a quella di oggi: la tecnologia del momento veniva ad essere privata del suo supporto energetico.

Dal secolo XIII in Europa il carbone era conosciuto come sorgente di calore, ma un ostacolo molto importante impediva la sua sostituzione alla legna su una scala apprezzabile. Al di là di una certa profondità, non molto grande d'altronde, ogni miniera era inondata dalle acque sotterranee. Ora in quell'epoca le fonti di potenza motrice erano limitate ai muscoli degli uomini, alle bestie da soma, al vento ed alle cascate d'acqua (18). Queste fonti non erano sufficientemente potenti per seccare le miniere, la quantità d'acqua era persino così grande che almeno centinaia di cavalli erano necessari a questa operazione.

E' significativo che né Galileo né Huygens poterono trovare una soluzione valida. Galileo consigliò ai minatori di utilizzare le pompe aspiranti, spiegando che la natura ha orrore del vuoto e fu molto perplesso quando gli riferirono che l'acqua non voleva salire nella pompa al di sopra di dieci metri. Huygens a sua volta sperimentò un cilindro nel quale cercò di far montare il pistone con l'aiuto della polvere da sparo!

La salvezza venne da Prometeo II, questa volta due mortali: Thomas Savery, che inventò la pompa a vapore e Thomas Newcomen, che inventò la prima macchina a vapore. Il loro dono ebbe un effetto prometeico. La macchina a vapore, a guisa del fuoco, rappresenta una conversione *qualitativa*, cioè, la conversione dell'energia *calorifica* in *energia motrice*. Come il fuoco la macchina a vapore trascina un processo a catena. Con una sola macchina a vapore e un po' di carbone si può estrarre molto carbone e altri minerali per produrre altre macchine a vapore con le quali si possono produrre ancora altre macchine a vapore e così via, purché vi sia sufficiente combustibile e minerali appropriati.

Come il dono di Prometeo I, la macchina a vapore mise gli uomini in grado di utilizzare per la prima volta una nuova e più potente fonte di energia motrice, quella dei combustibili fossili. Noi viviamo ancora nell'età di questi combustibili. Ma la straordinaria fortuna, mineralogica, che è cominciata circa duecento anni fa, si avvicina prematuramente alla fine, conseguenza inevitabile dell'impiego stravagante del secondo dono prometeico.

Nuovi orizzonti

Oggi la questione cruciale è sapere se un nuovo Prometeo verrà a risolvere la presente crisi dell'età del legno. Il reattore nucleare ordinario non è un dono prometeico: esso non fa che elargire la fonte di calore come l'ha fatto la scoperta del petrolio intorno al 1860. Il surgeneratore potrebbe essere un dono prometeico perché effettua una conversione qualitativa: quella dei *materiali fertili in combustibili sfaldabili* (fossili?). Questa conversione scatena anche un processo a catena almeno sulla carta. Sfortunatamente il surgenetatore è contornato di gravi rischi non ancora sufficientemente valutati. Quanto al controllo di una reazione termonucleare non si vede ancora alcuna luce all'altra estremità del tunnel. Non è d'altronde escluso che l'utilizzazione dell'energia termonucleare resti confinata alle bombe nella stessa maniera della polvere da sparo e della dinamite (Georgescu-Roegen, 1982, p. 36).

Ferventi speranze si sono concentrate recentemente sull'utilizzazione diretta dell'energia solare. Qualche anno fa Denis Hayes (1978) uno spirito molto metodico e ben informato, ha affermato categoricamente che "la tecnologia solare è già là. Oggi si può impiegarla". Sfortunatamente ciò che è già là non sono ricette fattibili. Una tecnologia solare non c'è ancora. Nessuna ricetta per raccogliere direttamente la energia solare conduce ad un processo a catena. Nessuna può sostenersi da sola, perché nessuna può concentrare sufficiente energia per riprodurre i collettori impiegati nell'operazione.

La prova di questa affermazione è della stessa natura di quella che serve a negare la possibilità del movimento perpetuo di prima specie, per esempio, Malgrado la propaganda persistente annunciante la salvezza grazie all'energia solare mantenuta da agenzie pubbliche e private, e malgrado i fondi apprezzabili che sono stati e vengono ancora distribuiti per la ricerca e sviluppo nel dominio dell'energia solare, non c'è neanche una piccola installazione sperimentale per provare che i collettori sono almeno autoproduttivi (19). Non si può obiettare che ciò costerà troppo denaro.

Entro certi limiti il costo non conta quando si tratta di un'esperienza cruciale (si pensi al viaggio sulla luna). Io credo, quindi, che l'assenza di una tale esperienza è in sé sufficientemente sintomatica. Mi sembra anche molto improbabile che un cambiamento intervenga fra poco. La difficoltà è grande, perché l'energia arriva al suolo con una intensità estremamente debole, un'enorme quantità di materia (i collettori) è dunque necessaria per concentrarla (Georgescu-Roegen, 1982, p. 118 e ss.) (20).

Senza dubbio la situazione può cambiare da cima a fondo senza alcun preavviso, ma poiché nessuno può essere sicuro che Prometeo III arriverà, né sapere esattamente quale sarà il suo dono, una sola strategia si impone senza appello, quella della conservazione generale. E' in questo modo solamente che avremo più tempo per attendere la scoperta di un nuovo dono prometei-

co o al peggio per scivolare lentamente e senza catastrofi verso una tecnologia meno "calda".

Evidentemente questa ultima tecnologia non potrà essere che una nuova età del legno, anche se differente da quella passata, perché oggi le nostre conoscenze tecniche sono più estese, non potrebbe essere altrimenti dato che ogni processo evolutivo è irreversibile. E se questo ritorno diventa necessario, la professione degli economisti subirà un curioso cambiamento, invece di essere esclusivamente preoccupati di crescita economica, gli economisti cercheranno criteri ottimi per pianificare la diminuzione.

Una politica salutare di conservazione non è un compito per una sola nazione, neppure per diverse nazioni. Essa necessita della stretta cooperazione di tutte le nazioni. Sfortunatamente una tale collaborazione urta contro ostacoli insormontabili, i quali appartengono tutti alla natura umana.

Da una parte la popolazione di numerosi paesi continua a crescere a grandi passi, a dispetto del fatto che essa ha già superato la capacità nutritiva normale della terra (21). Per renderci conto della gravità della situazione, pensiamo al fatto che se la densità della loro popolazione fosse uguale a quella del Bangladesh, gli Stati Uniti dovrebbero avere cinque miliardi di abitanti.

Per renderci conto delle difficoltà della situazione presente dell'umanità è sufficiente domandarci se gli Stati Uniti con i loro straordinari mezzi di produzione potranno nutrire una simile popolazione. D'altra parte nei Paesi dove l'industria è fortemente sviluppata il consumo per ogni abitante è cento volte più elevato che in molti altri paesi dove regna la povertà assoluta delle masse. E per l'apparecchio industriale dei Paesi sviluppati anche il comfort stravagante al quale i loro abitanti si sono abituati, un approvvigionamento di petrolio ampio ma a prezzo contenuto costituisce una questione di vita o di morte. Niente attualmente ci incoraggia a credere che la lotta per il possesso dell'ultimo barile di petrolio non condurrà ad una guerra nucleare (22).

Alla fine di una conferenza fatta dieci anni fa, dopo aver offerto un programma bioeconomico minimo, io mi domandavo: "l'umanità vorrà prestare attenzione a qualsiasi programma implicante degli impedimenti al suo attaccamento al comfort esomatico (derivato dagli organi slegati)? Forse il destino dell'uomo è avere una vita affannosa, eccitante e stravagante piuttosto che un'esistenza lunga, vegetativa e monotona" (Georgescu-Roegen, 1979, p. 104). Oggi una nuova corrente scientifica rende l'orizzonte più oscuro, più sinistro.

E' la biologia, che sostiene che i nostri comportamenti di base sono interamente determinati dalla nostra costituzione genetica. Geni atavici molto resistenti fanno dell'uomo un animale fondamentalmente aggressivo ed egoista (23). Anzi, anche se l'*homo sapiens sapiens* può comprendere ciò che deve fare per la sua salvezza ecologica, la sua natura gli impedisce di seguire il

consiglio della saggezza. Certamente vi è una crisi dell'energia, ma ciò che sembra veramente in crisi è la saggezza umana (24).

N O T E

- 1) Io vorrei rilevare *un aspetto della legge dell'entropia* che malgrado la sua importanza sembra generalmente ignorato. La legge dell'entropia non ha effetto quando i due corpi hanno la stessa temperatura. Pertanto il calore teoricamente può passare per conduzione da un corpo A a un corpo B di uguale temperatura se il corpo B è un gas che si estende producendo lavoro meccanico. La espansione isotermica in un ciclo di Carnot ne dà la prova (Georgescu-Roegen 1978). In effetti la definizione fisica dell'entropia, $S = \Delta Q/T$, si applica solamente quando il trasferimento di ΔQ ha luogo tra due corpi della stessa temperatura, T. Altrimenti, il trasferimento non sarebbe reversibile, come questa definizione esige. Malgrado ciò numerosi manuali illustrano questa formula attraverso il trasferimento di calore tra due corpi di temperatura ineguale.
- 2) Lord Rayleigh (1875) arrivò per primo alla formula dell'entropia di miscuglio. J. Willard Gibbs (1875-1876), che ottenne lo stesso risultato indipendentemente, aggiunse alcuni dettagli molto importanti.
- 3) Si comprende perché la quarta possibilità logica per un sistema termodinamico - cioè un sistema che non scambia che materia con l'esterno - non può esistere in realtà (Georgescu-Roegen, 1982).
- 4) Pertanto parecchi autori hanno sostenuto il contrario. Il caso più interessante è quello di Paul Samuelson che nell'ultima edizione di *Economics* ha affermato che la scienza è certamente capace di cambiare l'irreversibilità espressa dalla legge dell'entropia.
- 5) Una forma vicina di energia difesa in passato da sapienti che si sono ispirati all'epistemologia di Ernest Mach. Mach sosteneva che la scienza non deve servirsi dei concetti di cui non si può prendere direttamente conoscenza. Essi sostenevano che poiché solo l'energia, sotto differenti forme, stimola i nostri organi sensoriali, l'energia costituisce l'essenza universale unica, tanto che la materia non ne è che un aspetto. In particolare essi rigettavano la riduzione del calore al movimento di particelle materiali, l'idea per la quale lottava soprattutto Ludwig Boltzmann. I più grandi avvocati di questa concezione furono in Germania, George Helm (1887-1889) e Wilhem Ostwald (1891/2-1896; 1909). In Francia fu lo scienziato dai molti talenti, Pierre Duhem (1911) il quale è stato fedele alla dottrina fino alla fine. Per la controversia che ne seguì, vedere Erwin N. Hiebert (1971).
- 6) Io ho presentato una critica molto serrata dell'epistemologia impiegata per ridurre il calore a un miscuglio ibrido di leggi deterministe (meccanica hamiltoniana) e

di strutture aleatorie (Georgescu-Roegen, 1971). Benché molti anni siano passati io non trovo niente che debba essere modificato in questa critica.

- 7) Esiste una asimmetria anche tra la massa e l'energia, poiché se non ci fosse alcuna differenza tra questi due concetti, non ci sarebbe nessuna ragione per distinguerli nel vocabolario scientifico. Con una scelta convenevole di unità, l'equivalenza di Einstein potrebbe iscriversi $E = m$. Pertanto sarebbe assurdo concludere l'identità completa dell'energia e della massa.
- 8) Un'altra imperfezione del modello basato sulla scatola di Van't Hoff è il fatto che tra le due membrane, quando esse si toccano al centro, deve restare ancora del gas mescolato.
- 9) Anche con i miscugli di gas si possono impiegare altri metodi di separazione. Lord Rayleigh, che scriveva prima della scoperta di Van't Hoff, ha considerato la separazione di un miscuglio di idrogeno e di vapore dalla liquefazione del vapore (ciò che corrisponde ad una diminuzione dell'entropia del miscuglio). Erwin Schrödinger ha rimarcato che la separazione può essere effettuata anche con l'aiuto della gravità (W. Pauli, 1973). Le difficoltà della separazione dei miscugli materiali non sono apparse in pieno che al momento della separazione degli isotopi di uranio. I metodi che sono ancora utilizzati sono costosi e inefficaci. Ho appreso recentemente dal mio collega Thomas Martin che è stato sperimentato con il laser per la separazione degli isotopi, un metodo, in generale, più efficace. Una condizione essenziale per questo nuovo metodo è che il laser sia capace di liberare l'assunzione di un isotopo ma non degli altri. (Letokhov, 1977). Su ciò è necessario ricordare che la condizione richiama la proprietà antisimmetrica delle membrane semipermeabili.
- 10) Notiamo bene che questo concetto è definitivo solamente in termini termodinamici classici: sistema chiuso e lavoro meccanico.
- 11) Si tratta di un corollario della terza legge della termodinamica enunciata da W. Nernst, cioè è impossibile raggiungere lo zero della temperatura assoluta, dove ogni energia è utilizzabile.
- 12) Quest'ultimo principio dovrebbe essere riconosciuto come la legge di Plank (1913) anche se la prima suggestione in questa direzione è dovuta a Lord Rayleigh (1875).
- 13) Notiamo che le coordinate sono, per convenzione appropriate, positive per i flussi uscenti, e negative per i flussi entranti. Per questo modello di flussi - fondi come rappresentazione completa di un processo reale complesso, vedere Georgescu-Roegen, 1971, capitolo IX, e 1982, pp. 107 e 108.

- 14) L'accrescimento della popolazione può dunque turbare le cose, ma per nostro immediato proposito ogni aggravio malthusiano può essere lasciato da parte.
- 15) La presente definizione richiama il problema simile per un sistema lineare Leontief. Per le più economiche condizioni di questo problema vedere Georgescu-Roegen, 1966, pp. 334-37.
- 16) Questa tesi è stata appoggiata da un errore logico molto frequente secondo il quale un sistema che non può continuare a crescere deve necessariamente divenire stazionario.
- 17) Apparentemente, l'idea di trasformare l'economia politica in una scienza energetica non è del tutto nuova. Nei nostri giorni molti autori l'hanno esposta, ma nessun articolo contiene un concentrato di confusioni e stranezze come quello di R. Costanza (1980). Per una semplice critica vedere Georgescu-Roegen, 1980.
- 18) A causa della sua natura la polvere di cannone era allora come oggi, di impiego limitato.
- 19) La stampa, sempre portata ad esagerare, ha riportato che un surgeneratore solare prometeico è stato messo in funzione dall'azienda ben conosciuta Solarex (e. g. Omni, Ottobre 1982, p. 42). Pertanto in un eccellente studio del problema "*Energy Requirements for the Production of Silicon Solar Arrays*" (Solarew Corporation 1977, autocopiato) si riconosce che il procedimento necessita di materiali dall'esterno.
- 20) Infatti questa necessità si applica ugualmente ai reattori nucleari, ma per la ragione contraria: un'energia troppo intensa non deve espandersi.
- 21) Capacità normale corrisponde ad una agricoltura *organica*, cioè una agricoltura basata essenzialmente sull'energia solare. Oggi la terra è "forzata" da un'agricoltura meccanizzata, dai concimi chimici a da specie di alto rendimento (selezionate da Norman Borlaug). Ma tutte queste pratiche che sono abitualmente salutate come meraviglie della tecnologia rappresentano tuttavia dei movimenti contro l'economia delle risorse naturali. Esse hanno sostituito il trattore, per esempio, alla bestia da soma la quale costituisce ancora il migliore convertitore dell'energia solare in lavoro meccanico, (Georgescu-Roegen, 1971, 1979).
- 22) Vedere la mia dichiarazione in *Threatening Economy* New York Time Magazine, 30 dicembre 1979.
- 23) Il terreno per questa corrente è stato preparato da parecchi autori ma il più fervente interprete è Edward O. Wilson (1975). Per una critica serrata e nello stesso tempo ponderata vedere Mary Midgley (1978).

- 24) Questo articolo è stato oggetto di una comunicazione al *Colloque International Thermodynamique et Sciences de l'Homme*, Università di Parigi Val de Marne, 22, 23 giugno 1981. La presente versione contiene qualche nuova informazione.

OPERE CITATE

HANNES ALFVEN, *Atom, Man and the Universe*, San Francisco, W. H. Freeman, 1969.

KENNETH E. BOULDING, *The Economics of the Coming Spaceship Earth*, in H. JARRETT, ed., *Environmental Quality in a Growing Economy*, Baltimore, Johns Hopkins Press, 1966, pp. 3-14.

D. B. BROOKS and P. W. ANDREWS, *Mineral Resources, Economic Growth, and the World Population*, *Science*, 185 (5.7.1974), 13-19.

HARRISON BROWN, JAMES BONNER and JOHN WEIR, *The Next Hundred Years*, New York, Viking Press, 1957.

R. COSTANZA, *Embodied Energy and Economic Valuation*, *Science* 210, (12.12.1980), 1219-1224.

HERMAN DALY, ed., *Toward a Steady State Economy*, San Francisco, W. H. Freeman, 1973.

PIERRE DUHEM, *Traité Élémentaire de Mécanique Chimique Fondée sur la Thermodynamique*, vol. 1, Paris, Hermann, 1897; *Traité d'Energétique ou de Thermodynamique Générale*, 2 voll., Paris, Gauthier-Villars, 1911.

Sir ARTHUR EDDINGTON, *The Nature of the Physical World*, Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1958.

ALBERT EINSTEIN, *Autobiographisches/Autobiographical Notes*, in P. A. Schilpp, ed., *Albert Einstein. Philosopher-Scientist*, New York, Tudor, 1949.

FREDERICK ENGELS, *Dialectique de la Nature*, Paris, Editions Sociales, 1968.

ENRICO FERMI, *Thermodynamics*, New York Dover, 1966.

R. P. FEYNMAN, B. B. LEIGHTON and M. SANDS, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1, Reading Mass, Addison-Wesley, 1966.

NICHOLAS GEORGESCU-ROEGEN, *Analytical Economic: Issues and Problems*, Cambridge, Mass, Harvard University Press, 1966; *The Entropy Law and the Economic Process*, Cambridge, Mass, Harvard University Press, 1971, *Analisi economica e processo economico* (Presentazione di GIACOMO BECATTINI), Firenze, Sansoni, 1973; *The Steady State and Ecological Salvation:*

A Thermodynamic Analysis, BioScience, 27 (April 1977), 266-270, Traduction française in *Demain la Décroissance*, pp. 105-123 (a), *De la Science Economique à la Bioéconomie*, Revue d'Economie Politique, 88, (Mai-Juin 1978), 337-382; *Demain la Décroissance*, (Preface et traduction di Ivo Rens et Jacques Grinevald), Paris et Lausanne, Pierre - Marcel Favre, 1979; *Matter, a Resource ignored by Thermodynamics*, in L. E. St.Pierre and G. R. Brown, eds., *Future Sources of Organic Raw Materials*, I. CHEMRAWN (Invited lectures at the World Conference on Future Sources of Organic Raw Materials, Toronto, July 10-13, 1978), Oxford, Permagon, 1980, pp. 79-87; *Energy, Matter and Economic Valuations: Where Do We Stand?* in *Economics, Ecology, Energy*, in H. Daly et A. Umana, eds., Boulder, Westview Press, 1981, pp. 43-79; *Energia e miti economici*, Torino, Boringhieri, 1982.

J. WILLARD GIBBS, *On the Equilibrium of Heterogeneous Substances*, Trans. Conn. Acad. 3 (October 1875 - May 1876), ripubblicato in *The Scientific Papers of J. Williard Gibbs*, Vol. 1, London, Longmans and Green, 1908.

JACQUES GRINEVALD, *La Revolution Carnotienne: Thermodynamique, Economie et Idéologie*, Revue européenne des sciences sociales et Cahiers Vilfredo Pareto, 14 No. 36; (1976), 39-79.

DEN HAYES, *We can use Solar Energy Now*, Washington Post, 26 February 1978, DI-D4.

GEORG HELM, *Die Lehre von der Energie*, Leipzig, Felix, 1887; *Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung*, Leipzig, Veit. 1898.

ERWIN N. HIEBERT, *The Energetics Controversy and the New Thermodynamics*, in Duane H. D. Roller, ed., *Perspectives in the History of Science and Technology*, Norman, Univesity of Oklahoma Press, pp. 67-86.

Lord KELVIN, *On the Dynamical Theory of Heat, with Numerical Results, Deduced from Mr. Joule's Equivalent of a Thermal Unit and M. Regnault's Observations on Steam*, Trans Royal Soc. of Edinburgh, March 1851, ripubblicato in *Mathematical and Physical Papers*, vol.1, 1882; V. S. LETOKHOV, *Laser Separation of Isotopes*, Am. Rew. Phys. Chem, 28 (1977), 133-159.

MARY MIDGLEY, *Beast and Man*, Ithaca, Cornell University, Press, 1978.

WALTER NERNST, *Traité de Chimie Générale*, 10ème éd., Paris, Hermann 1922-23.

WILHELM OSTWALD, *Studien zur Energetok*, I et II, *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 2 (1891), 563-578; 10, (1892), 363-386; *Die Überwindung des wissenschaftlichen Materialismus*, *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 18 (1895), 305-320; *L' Energie*, Paris, Felix Alcan, 1909.

WOLFGANG PAULI, *Thermodynamics and the Kinetic Theory of Gases*, Cambridge, Mass, MIT Press, 1973.

MAX PLANCK, *Leçons des Thermodynamique*, Paris, Hermann, 1913.

ILYA PRIGOGINE, *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, 3rd ed., New York, Interscience Publishers, 1967.

ERNEST RABINOWICZ, *Frictional Wear of Materials*, New York, Wiley, 1965.

W. J. MACQUORN RANKINE, *Outlines of the Science of Energetics*, republicato in *Miscellaneous Scientific Papers*, London, Charles Griffin, 1881, pp. 209-228.

Lord RAYLEIGH, *On the Work that may be gained during the Mixing of Gases*, *Philosophical Magazine*, Ser. 4, 49, No. 325 (April 1875), 311-319.

GLEEN T. SEABORG, *The Eherwon Machine: The Possibilities for Reconciling Goals by Way of New Technology*, in Sam B. Schurr, ed. *Economic Growth and Environment*, Baltimore, Johns Hopkins Press, 1972, pp. 125-138.

STEVEN WEINBERG, *Les Trois Premières Minutes de l'Univers*, Paris, Seuil, 1978.

EDWARD O. WILSON, *Sociobiology: The New Synthesis*, Cambridge, Mass, Harward University Press, 1975.