

## Nicolas Georgescu Roegen

# Energia e miti economici

**Conferenza alla Yale University, 8 novembre 1972**

### **Prima parte.**

Ben difficilmente qualcuno esprimerebbe oggi apertamente una fede nell'immortalità dell'anima. Eppure molti di noi preferiscono non escluderne la possibilità e a questo scopo cerchiamo di combattere qualunque fattore che possa limitare la vita dell'umanità. L'idea che vede tutti d'accordo è che la dote entropica dell'umanità sia inesauribile, primariamente grazie alla capacità intrinseca dell'uomo di aggirare la legge dell'entropia in una maniera o un'altra.

Per cominciare, c'è la semplice argomentazione secondo cui, come è già accaduto con molte leggi di natura, anche quelle su cui si basa la finitezza delle risorse accessibili saranno confutate a loro volta. La difficoltà con questa argomentazione è che la storia dimostra con ancora maggiore forza, primo, che in uno spazio finito può esserci soltanto una quantità finita di bassa entropia e, secondo, che questa si riduce continuamente ed irrimediabilmente. L'impossibilità del moto perpetuo (di entrambi i tipi) è altrettanto confermata dalla storia quanto la legge di gravità.

Strumenti più sofisticati sono stati messi a disposizione dall'interpretazione statistica dei fenomeni della termodinamica - un tentativo di ristabilire la supremazia della meccanica appoggiato da una nozione sui generis di probabilità. Secondo questa interpretazione, la reversibilità dell'entropia da livelli alti a livelli bassi è un evento molto improbabile, ma non totalmente impossibile. E poiché questo evento è possibile, dovremmo essere capaci di provocarne la realizzazione a nostro piacimento grazie ad un qualche dispositivo ingegnoso, proprio come un baro può far uscire un "sei" quando vuole. Questo ragionamento serve solo a portare alla luce le irrisolvibili contraddizioni e gli errori insiti nelle fondamenta dell'interpretazione statistica preferita dagli adoratori della meccanica. [32, c. 6] Le speranze suscitate da queste interpretazioni furono così accese che ad un certo momento P. W. Bridgman, un'autorità in campo termodinamico, credette necessario scrivere un articolo proprio per esporre la fallacia dell'idea che ci si possa riempire le tasche di denaro con il "contrabbando di entropia".[11]

Occasionalmente e in maniera sommessamente, alcuni esprimono la speranza, un tempo sostenuta da un'autorità scientifica come John von Neumann,

che l'uomo possa scoprire alla fine il modo di rendere l'energia una merce gratuita, "proprio come l'aria" [3, p. 32]. Alcuni immaginano per esempio un "catalizzatore" che scomponga le acque marine in ossigeno ed idrogeno, la cui combustione ci darebbe tutta l'energia di cui avessimo bisogno. Ma l'analogia con la scintilla che fa bruciare della legna non calza. L'entropia della legna e l'ossigeno usato nella combustione è minore di quella delle ceneri e del fumo risultante, laddove l'entropia dell'acqua è maggiore di quella dell'ossigeno e dell'idrogeno dopo la scomposizione. Perciò, anche il catalizzatore miracoloso implica il contrabbando d'entropia.(1)

Con l'idea, che ora viene propagata in tutti gli editoriali, che i reattori a generazione producano più energia di quanta ne consumino, la fallacia del contrabbando di entropia sembra aver raggiunto il suo culmine finanche tra gli ampi circoli letterati, compresi gli economisti. Sfortunatamente, l'illusione si alimenta di sconclusionati discorsi interessati da parte di alcuni esperti nucleari che cantano le lodi dei reattori che trasformano materiale fertile ma non fissile in materiale fissile come dei generatori che "producono più energia di quanta ne consumino" [82, p. 82]. La cruda verità è che il generatore non è affatto diverso da un impianto che produca martelli servendosi di martelli. Secondo il principio del deficit della legge dell'entropia [...] anche nell'allevamento di polli, è consumata una quantità maggiore di bassa entropia rispetto a quella contenuta nel prodotto.(2)

Apparentemente in difesa della visione standard del processo economico, gli economisti hanno tirato l'acqua al proprio mulino. Possiamo ricordare per prima l'argomentazione che "la nozione di limite assoluto alla disponibilità delle risorse naturali non è sostenibile nel momento in cui la definizione di risorse cambia radicalmente ed in maniera imprevedibile nel corso del tempo... Un limite può esistere, ma non può essere né definito né specificato in termini economici" [3, pp. 7, 11]. Leggiamo anche che non esiste neppure un limite superiore della terra arabile perché "arabile è indefinibile" [5, p. 22] La sofisticheria di queste argomentazioni è flagrante. Nessuno potrebbe negare che non possiamo dire esattamente quanto carbone, per esempio, è accessibile. Le stime delle risorse naturali si sono dimostrate costantemente sottostimate. Ma anche così, la possibilità che i metalli contenuti nei primi chilometri di profondità della crosta terrestre possano essere un milione di volte le attuali riserve conosciute [4, p. 338; 58, p. 331] non dimostra l'inesauribilità delle risorse, ma, in maniera caratteristica, ignora sia la questione dell'accessibilità e dei rifiuti.(3) Qualunque sia la risorsa o terra arabile di cui possiamo aver bisogno ad un dato momento, consisteranno sempre di bassa entropia accessibile e terra accessibile. E poiché la somma di tutti i tipi di risorse è pur sempre una quantità finita, nessun cambio tassonomico potrà mai superare quella finitezza.

La tesi degli economisti tradizionali e di quelli di orientamento marxista, comunque, è che il potere della tecnologia è illimitato [3; 4; 10; 49; 51; 69; 74]. Saremo sempre in grado non solo di trovare un sostitutivo di una risorsa che sia diventata scarsa, ma anche di accrescere la produttività di

qualunque tipo di energia o materiale. Qualora dovessimo esaurire una certa risorsa, escogiteremo sempre qualcosa, proprio come abbiamo sempre fatto sin dai tempi di Pericle [4, pp. 332-334]. Perciò nulla potrebbe impedirci il cammino verso un'esistenza sempre più felice della specie umana. È difficile concepire una forma di pensiero lineare più ottusa di questa. Secondo la stessa logica, nessun giovane in salute dovrebbe mai essere afflitto dai reumatismi o da qualsivoglia altra malattia senile; né dovrebbe morire. I dinosauri, proprio poco prima di scomparire dal pianeta, avevano alle loro spalle non meno di centocinquanta milioni d'anni di esistenza davvero prospera. E non inquinavano l'ambiente con gli scarichi industriali! Ma la logica più gustosa è quella di Solo [73, p. 516]. Se la degradazione entropica potesse piegare l'umanità nel futuro, dovrebbe averlo già fatto dall'anno mille in qua. La verità di Seigneur de La Palice non era mai stata capovolta - ed in forma così divertente!(4)

A sostegno della stessa tesi si adducono anche argomentazioni che vanno più dirette al cuore del problema. Prima di tutto, vi è l'affermazione che solo alcuni tipi di risorse sono "tanto resistenti al progresso tecnologico da non ammettere l'estrazione a costi costanti o decrescenti" [3, p. 10].(5) Più recentemente, alcuni hanno formulato una legge specifica che, in un certo senso, è il contrario della legge di Malthus applicata alle risorse. L'idea è che la tecnologia migliora in maniera esponenziale [4, p. 236; 51, p. 664; 74, p. 45]. La giustificazione superficiale è che un progresso tecnologico ne induce un altro. Questo è vero, solo che non funziona in maniera cumulativa come nella crescita della popolazione ed è terribilmente sbagliato affermare, come fa Maddox [59, p. 21], che insistere sull'esistenza di un limite alla tecnologia significa negare la capacità dell'uomo di influire sul progresso. Anche se la tecnologia continuasse a progredire, non eccederebbe per forza ogni limite; una sequenza crescente può essere superiormente limitata. Nel caso della tecnologia, questo limite è definito dal coefficiente teorico d'efficienza [...] Se il progresso fosse davvero esponenziale, allora l'input  $i$  per unità di output seguirebbe la legge temporale  $i = i_0(1 + r)/t$  che tende a zero. In altri termini a partire da un certo istante, la produzione diventerebbe incorporea e la terra un nuovo paradiso terrestre.

Infine, c'è la tesi che può essere definita l'inganno della sostituibilità infinita: "Pochi componenti della crosta terrestre, compresa la terra arabile, sono talmente specifici da rendere impossibile la sostituzione economica; [...] la natura impone delle scarsità specifiche, non una scarsità generica inevitabile" [3, pp. 10f].(6) Nonostante la protesta di Bray [10, p. 8], si tratta di "un trucco da economista". È vero, ci sono pochi elementi "vitaminici" che giocano un ruolo tanto specifico quanto quello del fosforo per gli organismi viventi. L'alluminio, però, è stato sostituito dal ferro e dal rame in molti, ma non in tutti gli usi.(7) E comunque, la sostituzione nell'ambito di scorte finite di bassa entropia accessibile, la cui degradazione è accresciuta dall'uso, non può continuare per sempre.

Nelle mani di Solow, la sostituzione diventa il fattore chiave che supporta

il progresso tecnologico anche qualora le risorse divenissero sempre più scarse. Si realizzerà prima una sostituzione nello spettro dei beni di consumo. Poiché i prezzi reagirebbero all'aumento della scarsità, i consumatori comprerebbero "meno beni che richiedano un uso intensivo di risorse e più beni di altro tipo" [74, p. 47].**(8)** Più recentemente, ha esteso quest'idea anche all'ambito della produzione: potremmo, sostiene, sostituire "altri fattori alle risorse naturali" [75, p. 11]. Bisogna avere una visione completamente errata del processo economico nel suo complesso per non vedere che non vi sono fattori materiali che non siano risorse naturali. Sostenere che "il mondo può, di fatto, sopravvivere senza risorse naturali" è come ignorare la differenza tra il mondo reale ed il giardino dell'eden.

Più sorprendenti ancora sono i dati statistici invocati a sostegno di alcune delle tesi sopra elencate. I dati adottati da Solow [74, pp. 44f] mostrano che negli Stati Uniti tra il 1950 ed il 1970 il consumo di una serie di minerali per unità di PIL diminuì in maniera sostanziale. Le eccezioni erano attribuite alla sostituzione ma sarebbero rientrate nella tendenza, prima o poi. In senso stretto, i dati non provavano che in quello stesso periodo la tecnologia avesse avanzato necessariamente verso una maggiore economia di risorse. Il PIL può crescere più velocemente di ogni minerale usato come input anche se la tecnologia resta la stessa, o anche se peggiora. Ma sappiamo anche che praticamente nello stesso periodo, dal 1947 al 1967, il consumo pro capite di materie prime aumentò negli Stati Uniti. E nel mondo, nel corso di un solo decennio, dal 1957 al 1967, il consumo d'acciaio pro capite crebbe del 44% [12, pp. 198-200]. Ciò che conta, alla fine, non è l'impatto del progresso tecnologico sul consumo di risorse per unità di PIL, ma soprattutto l'incremento della velocità di esaurimento che è un effetto collaterale di quel progresso.

Ancora più sorprendenti - come si sono dimostrati essere - sono i dati usati da Barnett e Morse per dimostrare che, dal 1879 al 1957, il rapporto tra lavoro e costi di capitale rispetto alla produzione netta diminuì apprezzabilmente nell'agricoltura e nell'industria mineraria, entrambi settori cruciali per quanto concerne l'esaurimento delle risorse [3, 8f, 167-178]. Nonostante alcune incongruità aritmetiche,**(9)** il quadro che emerge da questi dati non possono essere contestati. Solo che la loro interpretazione deve essere corretta.

Perché la questione ambientale è essenziale per capire le forme tipiche in cui può avvenire il progresso economico. Un primo gruppo comprende le innovazioni economiche, che consentono un'economia netta della bassa entropia - grazie ad una combustione più completa, o per riduzione degli attriti, o ad una fiamma più intensa dal gas o dall'elettricità, oppure alla sostituzione di materiali che costano molto in termini energetici con altri che costano meno, e così via. In questo ambito dovremmo anche includere la scoperta di come usare nuovi tipi di bassa entropia accessibile. Un secondo gruppo consiste di innovazioni di sostituzione, che semplicemente sostituiscono l'energia umana con energia fisico-chimica. Un buon esempio è l'innovazione della polvere da sparo, che rese obsoleta la catapulta. Queste innovazioni in genere ci permettono non solo di fare

le cose meglio, ma anche (e soprattutto) fare cose che non si potevano fare prima - volare in aeroplano, per esempio. Infine, c'è lo innovazioni di spettro, che portano in essere nuovi beni di consumo, come il cappello, le calze di nylon ecc. La maggior parte delle innovazioni di questo gruppo sono allo stesso tempo innovazioni di sostituzione. Di fatto, la maggior parte delle innovazioni appartiene a più di una categoria, ma la classificazione è utile a scopi analitici.

Ora, la storia economica conferma un fatto piuttosto elementare - il fatto che i passi decisivi nel campo del progresso tecnologico sono stati in generale compiuto grazie alla scoperta di come usare un nuovo tipo di energia accessibile. D'altro canto, un grande passo avanti nella storia del progresso tecnologico non si può materializzare a meno che l'innovazione corrispondente non sia seguita da una grande espansione mineraria. Anche un incremento sostanziale nell'efficienza dell'uso della benzina come combustibile sarebbe insignificante rispetto all'incremento dei campi di petrolio conosciuti.

Questo genere di espansione è quanto è accaduto nel corso degli ultimi cento anni. Abbiamo individuato petrolio e scoperto nuovi depositi di carbone e gas una proporzione molto superiore a quella che potevamo usare nello stesso periodo. Ancora più importante, tutte le scoperte minerarie comprendevano una proporzione significativa di risorse facilmente accessibili. Questa eccezionale esuberanza di per se stessa è servita a diminuire il costo reale del portare le risorse minerarie in superficie. Con l'energia prodotta dalla sorgente minerale sempre più economica, le innovazioni di sostituzione hanno fatto sì che il rapporto tra forza lavoro e prodotto netto decrescesse. Anche il capitale deve essersi evoluto verso forme che costano meno ma usano più energia per ottenere lo stesso risultato. Ciò che è successo durante questo periodo è una modifica della struttura di costo, con l'aumento dei fattori di flusso e la diminuzione dei fattori di FUND. **(10)** Esaminando, perciò, solo le variazioni relative dei FUND FACTORS, nel corso di un periodo di eccezionale abbondanza mineraria, non possiamo dimostrare né che il costo totale unitario seguirà sempre un andamento decrescente né che il progresso continuo della tecnologia renda praticamente inesauribili le risorse accessibile - come affermano Barnett e Morse [3, p. 239].

Poco dubbio resta del fatto che le tesi qui esaminate sono ancorate ad una fede profonda nell'immortalità dell'umanità. Alcuni dei loro sostenitori ci spingono ad avere fede nella specie umana: questa fede trionferà su tutte le limitazioni. **(11)** Ma né la fede né le garanzie fornite da qualche cattedratico di fama [4] possono alterare il fatto che, secondo la legge di base della termodinamica, la dote dell'umanità è finita. Anche se si inclinasse a credere nella possibile confutazione di tutti questi principi in futuro, pure non bisogna agire sulla base di questa convinzione ora. Dobbiamo considerare che l'evoluzione non consiste in una ripetizione lineare, anche se su brevi periodi possiamo ingannarci e credere il contrario.

Molta confusione sui problemi ambientali prevale non solo tra gli economisti

in generale (come evidenziato dai numerosi casi citati), ma anche nei più alti circoli intellettuali, semplicemente perché la natura entropica di tutti i fenomeni è ignorata o incompresa. Sir MacFarlane Burnet, vincitore del premio Nobel per la medicina, in una conferenza speciale giudico imperativo "impedire la progressiva distruzione delle risorse non sostituibili della terra" [citato, 15, p. 1].

Ed un'istituzione prestigiosa come le Nazioni Unite, nella sua Dichiarazione sull'Ambiente umano (Stoccolma, 1972), ha fatto appello ad ognuno "per migliorare l'ambiente". In entrambi i casi, si può leggere l'errore di pensare che l'uomo possa invertire la rotta dell'entropia. La verità, per quanto spiacevole, è che tutto ciò che possiamo fare è impedire ogni consumo non necessario delle risorse e qualunque deterioramento non necessario dell'ambiente, ma senza crederci di conoscere il preciso significato di "non necessario" in questo contesto.

### **Lo stato stazionario: un miraggio classico**

Malthus, come sappiamo, fu criticato soprattutto perché assumeva che la popolazione e le risorse crescano in accordo ad una qualche legge matematica semplice. Ma queste critiche non aggiunsero a toccare il vero errore di Malthus (che è andato in apparenza sotto silenzio). Questo errore è l'assunzione implicita che la popolazione possa crescere oltre ogni limite, sia numericamente che nel tempo, a condizione che non cresca troppo rapidamente. **(12)** Un essere simile, nella sostanza, è stato commesso dagli autori di "The limits", dagli autori di "Blueprint for Survival", testo non matematico ma più articolato, e da altri autori anteriori. Infatti, come Malthus, essi volevano dimostrare soprattutto l'impossibilità della crescita e si lasciavano ingannare da un semplice sillogismo, oggi diffuso ma erroneo: poiché la crescita esponenziale in un modo finito condurrà a disastri di tutti i tipi, la salvezza ambientale è legata allo stato stazionario [42; 47; 62, pp. 156-184; 6, pp. 3f, 8, 20]. **(13)** H. Daly afferma addirittura che "perciò, lo stato stazionario è una necessità" [21, p. 5].

Questa visione di un mondo felice in cui sia la popolazione che il capitale restino costanti, originariamente descritta con la sua abilità tipica da John Stuart Mill [64, bk. 4, ch. 6], era rimasta nel dimenticatoio fino a poco fa. **(14)** A causa del suo spettacolare revival, è bene sottolinearne i problemi logici e fattuali. L'errore cruciale consiste nel non vedere che non soltanto la crescita, ma anche la crescita-zero, o meglio, finanche uno stato di decrescita che non converga all'annichilazione, non può esistere per sempre in un ambiente finito. L'errore forse deriva dalla confusione tra *riserva finita* e *flusso finito*, come lasciano pensare le dimensioni incongrue di alcuni grafici [62, pp. 62, 64f, 124ff; 6, p. 6]. E al contrario di quanto affermano alcuni sostenitori dello stato stazionario [21, p. 15], quest'ultimo non occupa una posizione privilegiata rispetto alle leggi della fisica.

Per andare al cuore del problema, diciamo  $S$  la quantità reale di risorse accessibili nella crosta terrestre. Diciamo poi  $P_i$  e  $s_i$  la popolazione e il

consumo pro capite di risorse all'anno  $i$ . Chiamiamo  $L$  la "quantità totale di vita", misurata in anni e definita dalla formula  $L = \sum_i P_i$ , per  $i$  che va da 0 a  $\infty$ .  $S$  impone un limite superiore ad  $L$  per via della condizione ovvia  $\sum_i P_i s_i \leq S$ . Infatti, benché  $s_i$  è una quantità storica, essa non può essere zero o trascurabile (a meno che l'umanità non ritorni ad una economia basata di raccolta). Perciò,  $P_i = 0$  per  $i$  maggiore di un certo valore finito  $n$  e  $P_i > 0$  altrimenti. Questo  $n$  fornisce la durata massima della vita della specie umana [31, pp. 12f; 32, p. 304].

La terra ha anche una cosiddetta capacità di carico, che dipende da un complesso di fattori, tra cui la dimensione di  $s_i$ . **(15)** Questa capacità definisce un limite per ogni valore singolo di  $P_i$ , ma questo limite non rende superflui gli altri, quelli ai valori di  $L$  e  $n$ . È perciò inesatto dire - come il gruppo di Meadows sembra fare [62, pp. 91f] - che lo stato stazionario può durare all'infinito fintanto che  $P_i$  non eccede quella capacità. Coloro che sostengono che lo stato stazionario può portare la salvezza devono ammettere che tale stato può avere solo una durata finita - a meno che non vogliano unirsi al club di coloro che credono che non esistano limiti considerando la quantità  $S$  inesauribile o quasi - come di fatto fa il gruppo di Meadows [62, p. 172]. Al contrario, essi devono spiegare il mistero di un'economia intera, stazionaria per un lungo periodo, che giunga ad una fine improvvisa.

Apparentemente, i sostenitori dello stato stazionario considerano quest'ultimo come equivalente ad uno stato stazionario termodinamico in un sistema aperto, che mantiene costante la propria struttura entropica attraverso scambi materiali con il proprio "ambiente". Come si intuisce facilmente, questo concetto costituisce uno strumento fondamentale per lo studio degli organismi biologici. Dobbiamo, però, osservare che il concetto si basa su alcune condizioni speciali che furono introdotte da L. Onsager [50, pp. 89-97].

Queste condizioni sono così delicate (sono indicate come il principio del bilancio dettagliato) che sono valide solo "entro una deviazione di pochi punti percentuali" [50, p. 140]. Per questa ragione uno stato stazionario può esistere di fatto solo in maniera approssimata e su un periodo di tempo limitato. Questa condizione, l'impossibilità che un sistema che non si trovi in uno stato di caos possa durare all'infinito, potrà un giorno essere espressamente riconosciuta come una nuova legge della termodinamica, esattamente come accadde per l'impossibilità del moto perpetuo. Gli specialisti ammettono che le leggi della termodinamica non sono sufficienti a spiegare tutti i fenomeni non reversibili, soprattutto quelli legati ai processi vitali.

Indipendentemente da questi impedimenti, esistono ragioni semplici per non credere che l'umanità possa vivere in uno stato stazionario perpetuo. La struttura di uno stato simile resta invariabile per tutta la sua durata; non contiene in se stesso il germe della morte inesorabile di tutti i sistemi termodinamici. D'altro canto, un mondo con una popolazione stazionaria sarebbe costretto a cambiare continuamente la propria tecnologia ed il suo stile di vita in risposta all'inevitabile riduzione dell'accessibilità delle

risorse. Anche se ignoriamo la questione di come il capitale possa cambiare qualitativamente eppure restare costante, potremmo dover assumere che la imprevedibile diminuzione dell'accessibilità venga miracolosamente compensata dalla giusta innovazione al momento giusto. Un mondo stazionario potrebbe per un certo tempo essere interallacciato con l'ambiente mutevole che lo ospita attraverso un sistema di feedback compensativo analogamente a quanto accade con gli organismi viventi durante una fase della loro vita. Ma, come Bormann ci ricorda [7, p. 707], il miracolo non può durare per sempre; prima o poi il sistema di bilanciamento crollerà. In quel momento lo stato stazionario entrerà in crisi.

Bisogna stare in guardia anche rispetto ad un altro errore logico, quello che consiste nell'invocare il principio di Prigogine a sostegno dello stato stazionario. Questo principio afferma che il minimo di entropia prodotta da un certo tipo di sistema termodinamico si raggiunge quando il sistema diventa stazionario [50, ch. 16]. Non dice nulla della relazione tra questo minimo di entropia e quella prodotta da altri sistemi aperti. **(16)**

Le argomentazioni solite che si adducono in favore dello stato stazionario sono, comunque, di una natura diversa, più diretta. Si sostiene, per esempio, che in tale stato i processi naturali hanno più tempo a disposizione per ridurre l'inquinamento e la tecnologia per adattarsi alla diminuzione dell'accessibilità delle risorse [62, p. 166]. È chiaramente vero che oggi potremmo usare il carbone in maniera molto più efficiente che in passato. Il punto è che non avremmo appreso le tecniche più efficienti attuali se non avessimo bruciato tutto quel carbone in maniera "inefficiente". Che in uno stato stazionario le persone non debbano lavorare di più per accumulare il capitale (che alla luce di quanto ho affermato nell'ultimo paragrafo non è del tutto esatto) si lega all'affermazione di Mill secondo cui le persone potrebbero dedicare più tempo alle attività intellettuali. La storia, comunque, offre esempi molteplici - il Medioevo, per dirne uno - di società quasi stazionarie in cui le arti e le scienze sono state praticamente stagnanti. Anche in uno stato stazionario le persone possono lavorare nei campi e nei laboratori per tutto il giorno. Qualunque sia lo stato, il tempo libero per il progresso intellettuale dipende dall'intensità della pressione esercitata dalla popolazione sulle risorse. Qui risiede la maggiore debolezza della visione di Mill. Ne testimonia il fatto che - come Daly ammette esplicitamente [21, pp. 6-8] - che i suoi scritti non offrono alcuna base per determinare neppure in principio i livelli ottimi di popolazione e capitale. Ciò porta alla luce il punto, importante ma trascurato, che la necessaria conclusione dei ragionamenti in favore di quella visione è che lo stato maggiormente desiderabile non è quello stazionario, ma uno di decrescita.

Indubbiamente la crescita attuale deve cessare, meglio, deve invertirsi. Ma chiunque creda di poter fare un piano per la salvezza ecologica della specie umana non comprende la natura dell'evoluzione, o anche della storia - che è quella di una lotta permanente in forme sempre nuove, non quella di un processo fisico-chimico predicibile e controllabile, come far bollire un uovo o lanciare un missile sulla luna.

## Seconda parte

### Fondamenti di Bioeconomia

Eccezion fatta per alcune eccezioni insignificanti, tutte le specie diverse da quella umana usano solo strumenti endosomatici - come Alfred Lotka propose di chiamare quegli strumenti (gambe, artigli, ali, ecc.) che appartengono all'organismo individuale sin dalla nascita. Solo l'uomo è giunto, nel tempo, ad usare un bastone, che non gli appartiene alla nascita, ma estende il suo braccio endosomatico e ne accresce il potere. In quel momento, l'evoluzione umana trascese i suoi limiti biologici per includere anche (e primariamente) l'evoluzione di strumenti esosomatici, cioè di strumenti prodotti dall'uomo ma non appartenenti al suo organismo. **(18)** È per questo che l'uomo può volare o nuotare sott'acqua anche se il suo corpo non ha ali, né pinne, né branchie.

L'evoluzione esosomatica portò con sé due cambiamenti fondamentali ed irrevocabili alla specie umana. Il primo è il conflitto sociale irriducibile che caratterizza le specie umane [29, pp. 98-101; 32, pp. 306-315, 348f]. Infatti, ci sono altre specie che pure vivono socialmente, ma sono libere da tale conflitto. L'uccisione periodica di gran parte dei fuchi da parte della api è un'azione biologica, naturale, non una guerra civile.

Il secondo cambiamento è la dipendenza dell'uomo dagli strumenti esosomatici - un fenomeno analogo a quello del pesce volante che divenne dipendente dall'atmosfera e si tramutò in pesce per sempre. È a causa di questa dipendenza che la sopravvivenza dell'umanità presenta una problematicità del tutto diversa da quella di tutte le altre specie [31; 32, pp. 302-305]. Non è né esclusivamente biologica, né esclusivamente economica. È bioeconomica. I suoi tratti complessivi dipendono dalle asimmetrie multiple che esistono tra le tre fonti di bassa entropia che, insieme, costituiscono la dote dell'umanità - l'energia libera ricevuta dal sole, da una parte, e l'energia libera e le strutture materiali ordinate nascoste nelle viscere della terra, dall'altra.

La prima asimmetria concerne il fatto che la componente terrestre è una riserva, mentre quella solare è un flusso. La differenza deve essere ben compresa [32, pp. 226f]. I giacimenti di carbone sono una riserva perché siamo liberi di usarlo tutto oggi (se possibile) o nel corso di secoli. Ma in nessun momento possiamo usare una qualunque porzione di un flusso futuro di radiazione solare. In aggiunta, il tasso di questo flusso di radiazione è interamente al di là del nostro controllo; è esattamente determinato da condizioni cosmologiche, tra cui la dimensione della nostra sfera. **(19)** Una generazione, per quanto ci provi, non può alterare la quota di radiazione solare che spetta ad una qualsiasi altra generazione futura. A causa della priorità che il presente ha rispetto al futuro e dell'irrevocabilità della degradazione entropica, il contrario è vero a proposito delle quote delle riserve terrestri. Queste ultime dipendono da quanto la dote terrestre sia stata consumata dalle generazioni precedenti.

Secondo, poiché non sono disponibili procedure pratiche su scala umana per la trasformazione dell'energia in materia... la bassa entropia del materiale accessibile è di gran lunga il fattore più critico dal punto di vista bioeconomico. È vero, un pezzo di carbone bruciato dai nostri bisnonni sarà per sempre andato, proprio come una parte dell'argento o del ferro, per esempio, che essi stessi estrassero. Invece le generazioni future riceveranno comunque la loro quota inalienabile di energia solare (che, come vedremo fra poco, è enorme). In questo modo potranno almeno usare ogni anno una quantità di legno equivalente alla crescita della vegetazione annuale. Per l'argento ed il ferro consumato dalle generazioni anteriori, non esiste una compensazione così semplice. È per questo in bioeconomia dobbiamo enfatizzare il fatto che ogni Cadillac o Zim - per non parlare degli strumenti di guerra - significa meno disponibilità per alcune generazioni future e, implicitamente, anche meno esseri umani in futuro [31, p. 13; 32, p. 304].

Terzo, c'è una differenza astronomica tra la quantità del flusso di energia solare e la dimensione della riserva terrestre di energia libera. A prezzo di una diminuzione della massa di  $131 \times 10^{12}$  tonnellate, il sole irradia annualmente  $10^{13}$  Q - con un singolo Q pari a  $10^{18}$  BTU! [1 BTU è uguale a 256,5 chilocalorie, NDT] Di questo fantastico flusso, solo circa 5300 Q sono intercettati ai limiti dell'atmosfera terrestre, mentre la metà circa viene riflessa nello spazio. Alla nostra scala, comunque, anche questa quantità è fantastica, dato che il consumo di energia mondiale ammonta a non più di 0,2 Q all'anno. Dall'energia solare che raggiunge il suolo, la fotosintesi assorbe solo 1,2 Q. Dalle cascate potremmo ottenere al massimo 0,08 Q, ma al momento ne ricaviamo solo la decima parte. Si pensi anche al fatto aggiuntivo che il sole continuerà a brillare con la stessa intensità per altri cinque miliardi di anni (prima di diventare una gigante rossa che farà aumentare la temperatura a oltre  $500^{\circ}\text{C}$ ). Indubbiamente, la specie umana non sopravviverà per godere di tutta questa abbondanza.

Passando alla dote terrestre, troviamo che, in accordo con le migliori stime, la dote iniziale di combustibile fossile ammontava a soli 215 Q. Le riserve rimanenti (conosciute e probabili) ammontano a circa 200 Q. Queste riserve, perciò, potrebbero produrre solo due settimane di luce solare sulla terra. **(20)** Se il loro consumo prosegue ai ritmi attuali, potranno sostenere l'attività industriale umana solo per pochi decenni. Anche le riserve di uranio 235 non dureranno per un periodo più lungo se le usiamo negli attuali reattori. Si nutrono speranze oggi nei confronti dei reattori autofertilizzanti, che, con l'aiuto di uranio 235, possono "estrarre" l'energia degli elementi fertili ma non fissili, l'uranio 238 ed il torio 232. Alcuni esperti sostengono che questa fonte di energia è "essenzialmente inesauribile" [83, p. 412]. Nei soli Stati Uniti, si crede che esistano ampie aree ricoperte da argilla nera e granito che contengono 60 grammi di uranio naturale o torio per tonnellata [46, pp. 226f]. Su questa base, Weinberg e Hammond [83, pp. 415f] hanno elaborato un grande piano. Estrahendo e frantumando tutte queste rocce, potremmo ottenere abbastanza combustibile nucleare per 32 mila reattori autofertilizzanti distribuiti in 4 mila locazioni remote e capaci di rifornire venti miliardi di

persone per milioni d'anni calcolando una quantità di energia pro capite pari al doppio del tasso di consumo attuale negli Usa. Questo piano grandioso è un esempio tipico di pensiero lineare, in accordo al quale tutto ciò che occorre per l'esistenza di una popolazione, anche "considerevolmente superiore di venti miliardi di persone", consiste nell'accrescere tutte le disponibilità proporzionalmente. **(21)** Non che gli autori neghino che esistono anche questioni non tecniche, solo che le minimizzano con un certo zelo [83, pp. 417f]. La più importante, cioè se una organizzazione sociale compatibile con la densità di popolazione e la manipolazione nucleare a grande scala possa essere ottenuta, è spazzata via da Weinberg in quanto "trans-scientifica" [82]. **(22)** I tecnici dimenticano facilmente che a causa dei loro successi, oggi, può essere più facile che la montagna vada a Maometto che Maometto alla montagna. Oggi l'ostacolo è ancora più palpabile, perché anche un solo reattore presenta pur sempre un rischio sostanziale di catastrofe nucleare ed il problema del trasporto sicuro dei combustibili nucleari e soprattutto quello dello stoccaggio delle scorie radioattive attendono ancora una soluzione, anche su scala operativa ridotta [35; 36; soprattutto 39 and 67].

Rimane il grande sogno dei fisici, la reazione termonucleare controllata. Affinché costituisca una vera rivoluzione, deve essere una reazione deuterio-deuterio, l'unica che potrebbe rendere accessibile una formidabile risorsa di energia terrestre per una lunga era. **(23)** Comunque, a causa delle difficoltà cui si accennava prima ... finanche gli esperti che vi lavorano non vedono ragioni di essere troppo speranzosi.

Per completezza, dovremmo anche menzionare l'energia delle maree e quella geotermica, che, benché non neglignibile (in tutto, 0,1 Q all'anno) può essere raccolta solo in situazioni molto ristrette.

Il quadro generale è ora chiaro. Le energie terrestri su cui possiamo contare effettivamente esistono solo in piccolissime quantità, laddove l'uso di quelle che esistono in quantità maggiori è circondato da grandi rischi e ostacoli tecnici formidabili. D'altra parte, c'è l'immensa energia del sole che ci raggiunge senza fallo. Il suo uso diretto non è ancora praticato su scala significativa, e la ragione primaria è che le industrie alternative sono ancora molto più efficienti economicamente. Ma risultati promettenti vengono anche da altre direzioni [37; 41]. Ciò che conta dal punto di vista bioeconomico è che la fattibilità dell'uso dell'energia del sole direttamente non è circondata da rischi o grandi punti interrogativi; è un fatto provato.

La conclusione è che la dote entropica dell'umanità presenta un'altra importante scarsità differenziale. Dal punto di vista del periodo estremamente lungo, l'energia libera terrestre è molto più scarsa di quella ricevuta dal sole. Ciò denuncia l'inutilità delle grida di vittoria al pensiero che possiamo ottenere proteine a partire da combustibili fossili! La ragione ci dice di muoverci nella direzione opposta, e convertire massa vegetale in idrocarburi - ovviamente una linea di ricerca battuta da diversi studiosi [22, pp. 311-313]. **(24)**

Quarto, dal punto di vista dell'utilizzo industriale, l'energia solare soffre di uno svantaggio enorme in confronto all'energia di origine terrestre. Quest'ultima è disponibile in forme concentrate; in alcuni casi troppo concentrate. Per effetto di ciò, ci permette di ottenere in maniera pressoché istantanea enormi quantitativi di lavoro, gran parte del quale non potrebbe neppure essere ottenuto in altro modo. Invece, il flusso di energia solare giunge a noi con una intensità estremamente bassa, come una pioggerellina, quasi una nebbia microscopica. La differenza importante dalla vera pioggia è che questa pioggia radioattiva non si raccoglie naturalmente in piccoli flussi, poi in ruscelli e fiumi ed infine in laghi in cui possiamo usarla in maniera concentrata, come nel caso delle cascate. Immaginiamo la difficoltà che ci troveremmo a fronteggiare se tentassimo di usare direttamente l'energia cinetica di gocce di pioggia microscopiche (cioè, non attraverso l'energia chimica della vegetazione, o l'energia cinetica del vento e delle cascate). Però, come si enfatizzava un po' di tempo fa, la difficoltà non è impossibilità. **(25)**

Quinto, l'energia solare, d'altro canto, ha un unico ed incommensurabile vantaggio. L'uso di qualsiasi energia terrestre produce una certa quantità di inquinamento, che, in aggiunta, non è smaltibile e quindi si accumula, fosse anche soltanto nella forma dell'inquinamento termico. Al contrario, l'uso dell'energia solare è privo di inquinamento. Infatti, che l'energia sia usata o meno, il suo destino ultimo non cambia, quello di dissiparsi sotto forma del calore che mantiene l'equilibrio termodinamico tra il globo e lo spazio ad una temperatura propizia. **(26)**

La sesta asimmetria riguarda direttamente il fatto elementare che la sopravvivenza di ogni specie sulla terra dipende, direttamente o indirettamente, dalla radiazione solare (in aggiunta ad alcuni elementi dello strato superficiale dell'ambiente). L'uomo soltanto, a causa della sua dipendenza esosomatica, dipende pure dalle risorse minerarie. Per l'uso di queste risorse l'uomo non compete con alcuna altra specie; però il loro uso da parte sua mette di solito in pericolo molte forme di vita, tra cui la sua propria. Alcune specie sono state costrette di fatto al limite dell'estinzione dai bisogni esosomatici dell'uomo o dal suo desiderio di ciò che è stravagante. Ma niente in natura raggiunge la ferocia della competizione umana per l'energia solare (nella sua forma elementare o in quelle derivate). L'uomo non si è spostato di un millimetro dalla legge della giungla, anzi, l'ha resa ancora più spietata con i suoi strumenti esosomatici. L'uomo ha cercato apertamente di sterminare ogni specie che lo privi del cibo o che si nutra a sue spese - i lupi, i conigli, l'erbaccia, gli insetti, i microbi ecc.

Questa lotta che l'uomo sostiene contro le altre specie per il cibo (in ultima analisi, per l'energia solare) ha degli aspetti che sfuggono. E, curiosamente, è uno di questi aspetti che ha ampie conseguenze e allo stesso tempo fornisce una confutazione estremamente istruttiva della comune credenza che ogni innovazione tecnologica costituisca un passo nella giusta direzione per quanto concerne l'economia delle risorse. Il caso riguarda l'economia delle moderne tecniche culturali. ...

Justus von Liebig osservò che la "civilizzazione ' l'economia del potere" [32, p. 304]. In questa ora, l'economia del potere in tutti i suoi aspetti ha bisogno di una svolta. Invece di continuare ad essere massimamente opportunisti e di concentrare la nostra ricerca nella individuazione di maniera economicamente efficienti di accedere alle risorse minerarie - tutte disponibili in quantità finite e tutte altamente inquinanti - dovremmo rivolegere i nostri sforzi verso il miglioramento degli usi diretti dell'energia solare - l'unica fonte pulita e praticamente illimitata. Tecniche già note dovrebbero essere diffuse senza ritardi tra tutte le persone cosicché possiamo apprendere tutti dalla pratica e sviluppare la forma corrispondente di scambio.

Un'economia basata primariamente sul flusso di energia solare farà anche a meno, anche se non completamente, del monopolio delle generazioni presenti rispetto a quelle future, perché anche in una economia del genere avremmo bisogno di far ricorso alla nostra dote genetica, soprattutto per il materiali. Le innovazioni tecnologiche avranno certamente un ruolo in questo senso, ma è il momento di smettere di dare importanza esclusivamente - come tutte le piattaforme hanno fatto finora - all'aumento dell'offerta. Anche la domanda può fare la sua parte, una anche più importante e di maggior efficienza in ultima analisi.

Sarebbe stupido proporre la rinuncia completa al comfort industriale dell'evoluzione esosomatica. L'umanità non tornerà nelle caverne, o, piuttosto, agli alberi. Ma vi sono alcuni punti che potrebbero essere inclusi in un programma minimo bioeconomico.

Anzitutto, la produzione di tutti gli strumenti di guerra, non solo la guerra stessa, dovrebbe essere proibita completamente. È del tutto assurdo (ed anche ipocrita) continuare a coltivare tabacco se, nelle dichiarazioni, nessuno vuole più fumare. Le nazioni che sono tanto sviluppate da essere i principali produttori di armamenti dovrebbe essere capaci di raggiungere un ampio consenso su questo divieto senza alcuna difficoltà se, come affermano, possiedono anche la saggezza per guidare l'umanità. Interrompere per sempre la produzione di questi strumenti di guerra non solo la farà finita con gli assassini di massa per mezzo di armi ingegnose ma libererà anche grandissime forze produttive che potranno essere impiegate per l'aiuto internazionale senza pregiudizio del livello di vita nei rispettivi paesi.

Secondo, grazie all'uso di queste forze produttive, come per mezzo di misure aggiuntive ben pianificate e oneste, le nazioni sottosviluppate devono essere aiutate a raggiungere il più rapidamente possibile un buon livello di vita (anche se non lussuoso). Entrambi questi aspetti devono pesare efficacemente negli sforzi richiesti da questa trasformazione per accettare la necessità di un cambio radicale nei loro sguardi polarizzati sulla vita.(27)

Terzo, l'umanità dovrebbe far decrescere gradualmente la sua popolazione fino ad un livello tale da poter essere alimentata esclusivamente dall'agricoltura organica.(28) Naturalmente, le nazioni che stanno

conoscendo un'alta crescita demografica dovranno impegnarsi seriamente per ottenere i risultati più rapidi possibili in questa direzione.

Quarto, fino a che non sia diventato comune l'uso diretto di energia solare o sia ottenuta la fusione controllata, tutti gli sprechi energetici - dovuti ad eccesso di riscaldamento, eccesso di raffreddamento, eccesso di velocità, eccesso di illuminazione ecc. - dovrebbero essere evitati con cura e, se necessario, regolati strettamente.

Quinto, dobbiamo curarci dal desiderio smodato di gadget stravaganti e da splendori mammuthiani come le automobili gigantesche. Fatto ciò, i produttori dovranno smettere di produrre questi "beni".

Sesto, dobbiamo liberarci anche della moda, quella "malattia mentale umana", come l'abate Fernando Galliani la caratterizzò nel suo celebre Della Moneta (1750). Costituisce infatti una malattia mentale liberarsi di un cappotto o di un pezzo d'arredamento quando può ancora servire. Comprare un'automobile "nuova" ogni anno e riammodernare la casa ogni due è un crimine bioeconomico. Altri autori hanno già proposto di far produrre i beni in maniera tale da durare di più [e.g., 43, p. 146]. Ma è finanche più importante che i consumatori si rieduchino in maniera da disprezzare la moda. I produttori dovranno quindi concentrarsi sulla durevolezza.

Settimo punto, e strettamente legato al precedente, è la necessità che i beni durevoli siano progettati in maniera da essere riparabili. (Con un'analogia plastica, in molti casi oggi giorno dobbiamo gettare un paio di scarpe solo per un difetto minore).

Ottavo, in completa armonia con i pensieri sopraelencati, dovremmo guarire da quella che ho chiamato "sindrome circolare del rasoio elettrico", che consiste nel radersi più velocemente, in maniera da avere più tempo per lavorare ad un rasoio che permetta di radersi più rapidamente ancora, in maniera da avere ancora più tempo per progettare un rasoio ancora più veloce, e così via all'infinito. Questo cambiamento richiederà una buona dose di autocritica da parte di tutte quelle professioni che hanno allettato l'umanità a questo regresso infinito. Dobbiamo arrivare a capire che un requisito importante per una buona qualità di vita è una quantità sostanziosa di svago spesa in maniera intelligente.

Sulla carta, astrattamente, le raccomandazioni che ho elencato dovrebbero apparire ragionevoli nel complesso a chiunque voglia esaminare la logica alla loro base. Ma un pensiero ha continuato ad aggirarsi per la mia mente da quando ho cominciato ad interessarmi alla natura entropica del processo economico: l'umanità darà ascolto a qualsivoglia programma implichi una riduzione della sua dipendenza dal confort esosomatico? Forse il destino dell'uomo è quello di avere una vita breve ma di fuoco, eccitante e stravagante invece che un'esistenza lunga, priva di eventi e vegetativa. Facciamo in modo che le altre specie - l'ameba, per esempio - che non hanno ambizioni spirituali ereditino una terra ancora bagnata dai raggi solari.

(1) Una visione suggestiva che sottintende il contrabbando di entropia è di Harry Johnson, che prevede la possibilità di ricostituire le riserve di carbone e petrolio "con un po' di fantasia" [49, p. 8]. Ma se ciò significa anche con sufficiente energia, occorre chiedersi perché perdere gran parte di quella energia nella trasformazione.

(2) La straordinaria resistenza del mito della produzione controllata, come in un allevamento, dell'energia è evidenziata dalla recente affermazione di Roger Revelle [70, p. 169] che "l'allevamento può essere pensato come una specie di reattore in cui si produce molta più energia di quanta se ne consumi". L'ignoranza delle principali leggi che governano l'energia è proprio diffusa.

(3) Anche gli economisti marxisti fanno parte di questo coro. Una recensione di [32], per esempio, obiettava che abbiamo appena scalfito la crosta terrestre.

(4) Per richiamare la famosa quartina francese: "Il Signor de la Palice / cadde nella battaglia di Pavia. / Un quarto d'ora prima della sua morte / era ancora vivo". (Traduzione mia) Si veda Grand Dictionnaire Universel du XIX<sup>e</sup> Siecle, vol. 10, p. 179.

(5) Finanche alcuni studiosi di scienze naturali, per esempio in [1], hanno accettato questa posizione. Curiosamente, il fatto storico che alcune civiltà fossero incapaci di "inventarsi qualcosa" è spazzato via dall'osservazione che erano "relativamente isolati" [13, p. 6]. Ma l'umanità non è forse una comunità completamente isolata da ogni influenza culturale e, per di più, impossibilitata a emigrare?

(6) Argomentazioni simili possono essere trovate in [4, pp. 338f; 59, p. 102; 74, p. 45]. Significativamente, Kaysen [51, p. 661] and Solow [74, p. 43], pur ammettendo la finitezza della dotazione entropica dell'umanità, non prendono la cosa sul serio perché non "conduce ad alcuna conclusione interessante". Gli economisti, tra tutti gli studiosi, dovrebbero sapere che il finito, non l'infinito, solleva questioni estremamente interessanti. Questo saggio spera di esserne prova.

(7) Anche in questo caso tra i più citati, la sostituzione non è stata coronata da successo da ogni punto di vista come crediamo in generale. Recentemente si è scoperto che i cavi elettrici in alluminio creano il rischio di incendio.

(8) La perla a questo proposito, comunque, è offerta da Maddox [59, p. 104]: "Proprio come la prosperità nei paesi attualmente avanzati è stata accompagnata da una diminuzione di fatto del consumo di pane, allo stesso modo possiamo aspettarci che la ricchezza rendere le società meno dipendenti da metalli quali l'acciaio".

(9) L'incongruità sta nel sommare capitale (misurato in termini monetari) e la forza lavoro (misurata dal numero di lavoratori impiegati) come pure

nel calcolo della produzione netta dalla produzione lorda fisica [3, pp. 167f].

**(10)** Per queste distinzioni, si vedano [27, pp. 512-519; 30, p. 4; 32, pp. 223-225].

**(11)** Si veda il dialogo tra Preston Cloud e Roger Revelle citato in [66, p. 416]. Lo stesso refrain attraversa la critica di Maddox a coloro che mettono in primo piano le limitazioni dell'umanità [59, pp. vi, 138, 280].

**(12)** Joseph Spengler, autorità riconosciuta in questo campo, mi dice che di fatto non conosce nessuno che possa aver fatto questa affermazione. Per alcune discussioni di Malthus molto penetranti e dell'attuale pressione demografica, si vedano [76; 77]

**(13)** La sostanza dell'argomentazione de I Limiti è presa in prestito da Boulding and Daly [8; 9; 20; 21].

**(14)** Nell'Enciclopedia internazionale delle Scienze sociali, per esempio, questo punto è menzionato di passata.

**(15)** Ovviamente, qualunque aumento di  $s_j$  produrrà in generale la diminuzione di  $L$  e di  $n$ . Inoltre, la capacità di carico può aumentare per via di un uso maggiorato di risorse terrestri. Queste considerazioni elementari dovrebbero essere ricordate e usate.

**(16)** L'argomentazione richiama l'idea di Boulding secondo cui il flusso in entrata la processo economico, che chiama "velocità di trasmissione", è "qualcosa da minimizzare e non massimizzare" e che dovremmo passare da un'economia di flusso ad uno di riserva [8, pp. 9f; 9, pp. 359f]. L'idea è appariscente più che illuminante. È vero, gli economisti soffrono del complesso del flusso [29; 55; 88]; inoltre, non hanno ben compreso che la corretta descrizione analitica di un processo deve comprendere sia i flussi che i fondi [30; 32, pp. 219f, 228-234]. Gli imprenditori, per quanto concerne l'idea di Boulding, hanno sempre mirato a ridurre il flusso necessario a mantenere i loro fondi di capitale. Se il flusso in entrata attualmente dalla natura non è commensurato alla sicurezza della nostra specie, è solo perché la nostra popolazione è troppo ampia e una sua parte gode di confort eccessivo. Le decisioni economiche si baseranno sempre necessariamente sia sui flussi che sui fondi. Non è vero che il problema dell'umanità consiste nel fare economia di  $S$  (le riserve) per la massima durata possibile della vita, e che ciò implichi la minimizzazione di  $s_j$  (un flusso) per una qualche "vita buona"?

**(17)** Ho trovato questo termine usato per la prima volta in una lettera da Jiri Zeman.

**(18)** La pratica della schiavitù, nel passato, e la possibilità, in futuro, del commercio di organi sono fenomeni omogenei all'evoluzione esosomatica.

**(19)** Un fatto ampiamente incompreso: la terra per Ricardo ha valore economico per la stessa ragione per cui l'ha la rete di un pescatore. La terra cattura l'energia di maggior valore, approssimativamente in proporzione alla sua superficie totale [27, p. 508; 32, p. 232].

**(20)** Le stime usate in questa sezione sono state calcolate dai dati di Daniels [22] ed Hubbert [46]. Questi dati, soprattutto quelli relativi alle riserve, variano da autore ad autore ma non in misura realmente significativa. Comunque, l'affermazione che "i vasti giacimenti petroliferi che saranno scoperti in tutto il mondo [dureranno] per non meno di 40 mila anni" [59, p. 99] è pura fantasia.

**(21)** In una risposta ai critici (*American Scientist* 58, no. 6, p. 610), gli stessi autori dimostrano, ancora una volta linearmente, che i complessi agroindustriali potrebbero facilmente rispondere ai bisogni di una tale popolazione.

**(22)** Per una discussione recente dell'impatto sociale della crescita industriale, in generale, e dei problemi sociali prodotti dall'uso su larga scala dell'energia nucleare, in particolare, si veda [78], una monografia di Harold e Margaret Sprout, pionieri in questo campo.

**(23)** Solo l'1% del deuterio nell'oceano potrebbe fornire  $10^8$  Q se impiegato in quella reazione, una quantità di energia ampiamente sufficiente per alcune centinaia di milioni di anni di elevato confort industriale. La reazione deuterio-trizio ha migliori possibilità di successo perché richiede una temperatura inferiore, ma poiché coinvolge il litio 6, che esiste in piccoli quantitativi, potrebbe fornire in totale 200 Q.

**(24)** Dovrebbe essere di interesse sapere che durante la seconda guerra mondiale, in Svezia per esempio, le automobili erano alimentate con il gas di risulta ottenuto dalla combustione del carbone in un contenitore che fungeva da serbatoio!

**(25)** [Nota del redattore: gli scritti più recenti di Georgescu-Roegen sono meno ottimisti rispetto alle prospettive di uso diretto dell'energia solare. Si veda il suo "Energy Analysis and Economic Valuation," *Southern Economic Journal*, April 1979.]

**(26)** Una precisazione necessaria: anche l'uso dell'energia solare potrebbe alterare il clima se l'energia viene rilasciata in un luogo diverso da quello in cui viene accumulata. Lo stesso è vero per la dilazione temporale, ma in questo caso difficilmente in una misura di interesse nella pratica.

**(27)** Alla Conferenza Dai Dong (Stoccolma, 1972), ho suggerito l'adozione di una misura che mi sembra applicabile con molte meno difficoltà di installazioni di qualunque tipo. Il mio suggerimento, invece, consisteva nel permettere alle persone di muoversi liberamente da un paese ad un altro qualsiasi. L'accoglienza che ricevetti fu meno che

tiepida. Si veda [2, p. 72].

**(28)** Per evitare qualsiasi fraintendimento, dovrei aggiungere che l'entusiasmo attuale nei confronti dell'agricoltura biologica non ha niente a che vedere con questa proposta [...]

### **Riferimenti bibliografici**

- [1] Abelson, Philip H. "Limits to Growth." *Science*, 17 March 1972, p. 1197.
- [2] Artin, Tom. *Earth Talk: Independent Voices on the Environment*. New York: Grossman, 1973.
- [3] Barnett, Harold J., and Chandler Morse. *Scarcity and Growth*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1963.
- [4] Beckerman, Wilfred. "Economists, Scientists, and Environmental Catastrophe." *Oxford Economic Papers* (November 1972), 327-344.
- [5] Blin-Stoyle, R. J. "The End of Mechanistic Philosophy and the Rise of Field Physics." In *Turning Points in Physics*, edited by R. J. Blin-Stoyle et al. Amsterdam: North-Holland, 1959, pp. 5-29.
- [6] "A Blueprint for Survival." *The Ecologist* (January 1972), 1-43.
- [7] Bormann, F. H. "Unlimited Growth: Growing, Growing, Gone?" *BioScience* (December 1972), 706-709.
- [8] Boulding, Kenneth. "The Economics of the Coming Spaceship Earth." In *Environmental Quality in a Growing Economy*, edited by Henry Jarrett. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1966, pp. 3-14.
- [9] Boulding, Kenneth. "Environment and Economics." In [66], pp. 359-367.
- [10] Bray, Jeremy. *The Politics of the Environment*, Fabian Tract 412. London: Fabian Society, 1972.
- [11] Bridgman, P. W. "Statistical Mechanics and the Second Law of Thermodynamics." In *Reflections of a Physicist*, 2d ed. New York: Philosophical Library, 1955, pp. 236-268.
- [12] Brown, Harrison. "Human Materials Production as a Process in the Biosphere." *Scientific American* (September 1970), 195-208.
- [13] Brown, Lester R., and Gail Finsterbusch. "Man, Food and

Environment." In [66], pp. 53-69.

[14] Cannon, James. "Steel: The Recyclable Material." *Environment* (November 1973), 11-20.

[15] Cloud, Preston, ed. *Resources and Man*. San Francisco: W. H. Freeman, 1969.

[16] Cloud, Preston. "Resources, Population, and Quality of Life." In *Is There an Optimum Level of Population?*, edited by S. F. Singer. New York: McGrawHill, 1971, pp. 8-31.

[17] Cloud, Preston. "Mineral Resources in Fact and Fancy." In [66], pp. 7188.

[18] Commoner, Barry. *The Closing Circle*. New York: Knopf, 1971.

[19] Culbertson, John M. *Economic Development: An Ecological Approach*. New York: Knopf, 1971.

[20] Daly, Herman E. "Toward a Stationary-State Economy." In *Patient Earth*, edited by J. Harte and R. Socolow. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1971, pp. 226-244.

[21] Daly, Herman E. *The Stationary-State Economy*. Distinguished Lecture Series no. 2, Department of Economics, University of Alabama, 1971.

[22] Daniels, Fartington. *Direct Use of the Sun's Energy*. New Haven: Yale University Press, 1964.

[23] Einstein, Albert, and Leopold Infeld. *The Evolution of Physics*. New York: Simon and Schuster, 1938.

[24] "The Fragile Climate of Spaceship Earth." *Intellectual Digest* (March 1972), 78-80.

[25] Georgescu-Roegen, Nicholas. "The Theory of Choice and the Constancy of Economic Laws." *Quarterly Journal of Economics* (February 1950), 125-138. Reprinted in [29], pp. 171-183.

[26] Georgescu-Roegen, Nicholas. "Toward a Partial Redirection of Econometrics," Part III. *Review of Economics and Statistics* 34 (August 1952), 206-211.

[27] Georgescu-Roegen, Nicholas. "Process in Farming versus Process in Manufacturing: A Problem of Balanced Development." In *Economic Problems of Agriculture in Industrial Societies*, edited by Ugo Papi and Charles Nunn. London: Macmillan; New York: St. Martin's Press, 1969, pp.

497-528.

[28] Georgescu-Roegen, Nicholas. "Further Thoughts on Corrado Gini's Dellusioni dell' econometria." *Metron* 25, no. 104 (1966), 265--279.

[29] Georgescu-Roegen, Nicholas. *Analytical Economics: Issues and Problems*. Cambridge: Harvard University Press, 1966.

[30] Georgescu-Roegen, Nicholas. "The Economics of Production." *American Economic Review* 40 (May 1970), 1-9.

[31] Georgescu-Roegen, Nicholas. "The Entropy Law and the Economic Problem." Distinguished Lecture Series no. 1, Department of Economics, University of Alabama, 1971. Reprinted in this volume.

[32] Georgescu-Roegen, Nicholas. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge: Harvard University Press, 1971.

[33] Georgescu-Roegen, Nicholas. "Process Analysis and the Neoclassical Theory of Production." *American Journal of Agricultural Economics* 54 (May 1972), 279-294.

[34] Gillette, Robert. "The Limits to Growth: Hard Sell for a Computer View of Domsday." *Science*, 10 March 1972, pp. 1088-1092.

[35] Gillette, Robert. "Nuclear Safety: Damaged Fuel Ignites a New Debate in AEC." *Science*, 28 July 1972, pp. 330-331.

[36] Gillette, Robert. "Reactor Safety: AEC Concedes Some Points to Its Critics." *Science*, 3 November 1972, pp. 482-484.

[37] Glaser, Peter E. "Power from the Sun: Its Future." *Science*, 22 November 1968, pp. 857-861.

[38] Goeller, H. E. "The Ultimate Mineral Resource Situation." *Proceedings of the National Academy of Science, USA* (October 1972), 2991-2992.

[39] Gofman, John W. "Time for a Moratorium." *Environmental Action* (November 1972), 11-15.

[40] Haar, D. ter. "The Quantum Nature of Matter and Radiation." In *Turning Points in Physics*, edited by R. J. Blin-Stoyle et al. (Amsterdam: North-Holland, 1959), pp. 30--44.

[41] Hammond, Allen L. "Solar Energy: A Feasible Source of Power?" *Science*, 14 May 1971, p. 660.

[42] Hardin, Garrett. "The Tragedy of the Commons." *Science*, 13 December 1968, pp. 1234-1248.

- [43] Hibbard, Walter R., Jr. "Mineral Resources: Challenge or Threat?" *Science*, 12 April 1968, pp. 143-145.
- [44] Holdren, John, and Philip Herera. *Energy*. San Francisco: Sierra Club, 1971.
- [45] Hotelling, Harold. "The Economics of Exhaustible Resources." *Journal of Political Economy* (March-April 1931), 137-175.
- [46] Hubbert, M. King. "Energy Resources." In [15], pp. 157-242.
- [47] Istock, Conrad A. "Modern Environmental Deterioration as a Natural Process." *International Journal of Environmental Studies* (1971), 151-155.
- [48] Jevons, W. Stanley. *The Theory of Political Economy*, 2d ed. London: Macmillan, 1879.
- [49] Johnson, Harry G. *Man and His Environment*. London: The British-North American Committee, 1973.
- [50] Katchalsky, A., and Peter F. Curran. *Nonequilibrium Thermodynamics in Biophysics*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1965.
- [51] Kaysen, Carl. "The Computer That Printed Out W\*O\*L\*F\*." *Foreign Affairs* (July 1972), 660-668.
- [52] Kneese, Allen, and Ronald Ridker. "Predicament of Mankind." *Washington Post*, 2 March 1972.
- [53] Laplace, Pierre Simon de. *A Philosophical Essay on Probability*. New York: Wiley, 1902.
- [54] Leontief, Wassily. "Theoretical Assumptions and Nonobservable Facts." *American Economic Review* (March 1971), 1-7.
- [55] "Limits to Misconception." *The Economist*, 11 March 1972, pp. 20-22.
- [56] Lovering, Thomas S. "Mineral Resources from the Land." In [15], pp. 109-134.
- [57] MacDonald, Gordon J. F. "Pollution, Weather and Climate." In [66], pp. 326-336.
- [58] Maddox, John. "Raw Materials and the Price Mechanism." *Nature*, 14 April 1972, pp. 331-334.
- [59] Maddox, John. *The Domsday Syndrome*. New York: McGraw-Hill, 1972.

[60] Marshall, Alfred. *Principles of Economics*, 8th ed. London: Macmillan, 1920.

[61] Marx, Karl. *Capital*. 3 vols. Chicago: Charles H. Kerr, 1906-1933.

[62] Meadows, Donella H., et al. *The Limits to Growth*. New York: Universe Books, 1972.

[63] Metz, William D. "Fusion: Princeton Tokamak Proves a Principle." *Science*, 22 December 1972, p. 1274B.

[64] Mill, John Stuart. *Principles of Political Economy*. In *Collected Works*, edited by J. M. Robson, vols. 2-3. Toronto: University of Toronto Press, 1965.

[65] Mishan, E. J. *Technology and Growth: The Price We Pay*. New York: Praeger, 1970.

[66] Murdoch, William W., ed. *Environment: Resources, Pollution and Society*. Stamford, Conn.: Sinauer, 1971.

[67] Novick, Sheldon. "Nuclear Breeders." *Environment* (July-August 1974), 6-15.

[68] Pigou, A. C. *The Economics of Stationary States*. London: Macmillan, 1935.

[69] *Report on Limits to Growth*. Mimeographed. A Study of the Staff of the International Bank for Reconstruction and Development, Washington, D.C., 1972.

[70] Revelle, Roger. "Food and Population." *Scientific American* (September 1974), 161-170.

[71] Schrodinger, Erwin. *What Is Life?* Cambridge, England: The University Press, 1944.

[72] Silk, Leonard. "On the Imminence of Disaster" *New York Times*, 14 March 1972.

[73] Solo, Robert A. "Arithmomorphism and Entropy." *Economic Development and Cultural Change* (April 1974), 510-517.

[74] Solow, Robert M. "Is the End of the World at Hand?" *Challenge* (March/April 1973), 39-50.

[75] Solow, Robert M. "The Economics of Resources or the Resources of Economics." Richard T. Ely Lecture, *American Economic Review* (May 1974), 1-14.

[76] Spengler, Joseph J. "Was Malthus Right?" Southern Economic Journal (July 1966), 17--34.

[77] Spengler, Joseph J. "Homosphere, Seen and Unseen: Retreat from Atomism. " Proceedings of the Nineteenth Southern Water Resources and Pollution Control Conference, 1970, pp. 7-16.

[78] Sprout, Harold, and Margaret Sprout. Multiple Vulnerabilities. Mimeographed. Research Monograph No. 40, Center of International Studies, Princeton University, 1974.

[79] Summers, Claude M. "The Conversion of Energy." Scientific American (September 1971), 149-160.

[80] Wallich, Henry C. "How to Live with Economic Growth." Fortune (October 1972), 115-122.

[81] Weinberg, Alvin M. "Breeder Reactors." Scientific American (January 1960), 82-94.

[82] Weinberg, Alvin M. "Social Institutions and Nuclear Energy." Science, 7 July 1972, pp. 27-34.

[83] Weinberg, Alvin M., and R. Philip Hammond. "Limits to the Use of Energy." American Scientist (July-August 1970), 412--418.

