

Termodinamica e complessità di Pietro Greco

In un articolo dal titolo "Science and Complexity", pubblicato nel 1948 sulla rivista *American Scientist*, il matematico Warren Weaver sosteneva che in natura esistono tre diverse classi di sistemi dinamici:

- a) i "sistemi semplici", caratterizzati dalla presenza di poche variabili, tradizionale oggetto di studio della fisica e delle discipline medico-biologiche fino all'800;
- b) i "sistemi a complessità disorganizzata", caratterizzati da un numero estremamente elevato di variabili, ciascuna tuttavia con un comportamento individuale casuale o sconosciuto. Questi sistemi, scriveva Weaver, possono essere trattati in termini di proprietà medie e di regolarità dell'insieme;
- c) i "sistemi a complessità organizzata", caratterizzati da un numero considerevole di variabili connesse in un tutto organico. Sono questi i sistemi che incontriamo in biologia, in medicina, in psicologia, in economia e nelle scienze politiche. I problemi posti dai "sistemi a complessità organizzata", sosteneva ancora Weaver, sono "troppo complicati per sottomettersi alle vecchie tecniche del XIX secolo che avevano un successo così evidente nei problemi di semplicità a due, a tre o a quattro variabili.

Questi nuovi problemi, inoltre, non possono essere manipolati con le tecniche statistiche così efficaci nel descrivere il comportamento medio dei problemi di complessità disorganizzata".

Warren Weaver era una persona di prestigio. E, soprattutto, una persona geniale. Con una grande e riconosciuta capacità di interconnettere discipline diverse. D'altra parte per oltre vent'anni, dal 1932 al 1955, ha diretto la divisione di scienze naturali della Rockefeller Foundation.

E da quella posizione, sul finire degli anni '30, aveva dato una spinta formidabile e persino il nome a una scienza che stava muovendo i primi passi, ma che era destinata a diventare la scienza regina della seconda parte del Novecento, la biologia molecolare.

L'articolo su scienza e complessità che Warren Weaver aveva pubblicato sull'*American Scientist* non passò, dunque, inosservato. Anche perché Weaver lanciava un programma che era una previsione. Finora la scienza (in particolare, la fisica) si era interessata ai "sistemi semplici", perché non aveva a disposizione gli strumenti di calcolo e, quindi, gli strumenti concettuali per studiare i "sistemi complessi". Ma nei successivi cinquant'anni la scienza sarebbe stata chiamata a risolvere i due problemi, diversi, posti dalla complessità disorganizzata e dalla complessità organizzata.

Warren Weaver aveva visto, ancora una volta, giusto. Nella seconda parte del XX secolo, grazie, appunto, ai computer e alla loro inusitata potenza di calcolo, lo studio dei sistemi complessi in fisica, in chimica, in biologia, persino in economia, si è imposto davvero come uno dei nuovi e grandi poli di attrazione della ricerca scientifica. La complessità è diventato un tema dominante della scienza e della filosofia. Anche se ci limitiamo al solo ambito scientifico, molti e spesso strutturalmente diversi sono stati in questi pochi anni gli approcci allo studio dei sistemi complessi. Tanto che, a tutt'oggi, non abbiamo neppure una definizione condivisa di complessità.

Un matematico come Gregory Chaitin o come Andrei Kolgomorov, per esempio, attribuisce al termine "complessità" un significato (complessità algoritmica) alquanto diverso da quello che gli attribuisce un medico come Stuart Kauffman (autorganizzazione ai confini del caos), un biologo come Brian Goodwin (campi morfogenetici), un chimico come Manfred Eigen (metaevoluzione) o anche un fisico come Murray Gell-Mann (complessità adattiva).

I due principi della termodinamica

Molti tra questi approcci scientifici sono alla ricerca di una teoria unificata (e matematizzata) dei sistemi complessi. Nessuno, almeno finora, l'ha trovata. Forse perché la complessità, come aveva intuito Warren Weaver, non è una sola e, nelle sue forme organizzate, non è riducibile a una legge

matematizzata.

Ci aiuta a comprenderlo meglio la vicenda di uno degli approcci più tradizionali alla complessità, quello termodinamico.

L'origine di questo approccio può essere fatta risalire agli anni '50 e '60 del XX secolo, gli anni in cui si sviluppano gli studi sui sistemi cosiddetti "lontani dall'equilibrio". E alcuni cominciano a pensare che in quegli studi ci sono le risposte, matematizzate, alle domande che si pone chiunque sia alla ricerca della legge della complessità: perché a ogni livello nell'universo vediamo strutture ordinate, e addirittura altamente ordinate? E perché vediamo che in molte di queste strutture l'ordine tende, addirittura, ad aumentare? Perché - volendo porre la domanda in termini che a un fisico apparirebbero più rigorosi - localmente nell'universo l'entropia tende a diminuire e, talvolta, a diminuire fortemente, in contraddizione (apparente) proprio con una delle leggi fondamentali della termodinamica, la quale pretende che ad aumentare inesorabilmente non sia l'ordine, ma il disordine cosmico?

Prima di addentrarci nell'approccio termodinamico alle questioni di fondo della complessità e, quindi, di trovare una qualche risposta a queste domande, conviene cercare di capire cos'è, in definitiva, la scienza termodinamica e cosa impongono le sue leggi.

La termodinamica è la scienza che studia gli scambi di energia. È nata e si è sviluppata nell'800, rispondendo anche alle richieste del nuovo modo industriale di produzione che andava prosperando grazie a quelle nuove tecnologie del vapore capaci di trasformare il calore in energia meccanica. La termodinamica si fonda su due principi "ottocenteschi" che ancora oggi, sia pure con qualche modifica o postilla, sono considerati universali e, quindi, inderogabili.

Il primo principio, proposto nel 1847 da Hermann von Helmholtz, recita: "l'energia dell'universo e di ogni sistema isolato è costante". Oggi questoprincipio va interpretato alla luce dei risultati conseguiti da Albert Einstein e dalla meccanica relativistica, secondo cui energia e materia sono equivalenti e, quindi, a essere costante nell'universo è la somma di materia ed energia. Il principio va interpretato anche alla luce dei contributi della meccanica quantistica e, in particolare, di quel principio di indeterminazione di Heisenberg che consente di scovare fonti di energia anche nel vuoto (che non è il nulla). Tanto che, si pensa, quella effimera del vuoto è l'energia prevalente nel cosmo. Al netto di questi rilievi (niente affatto banali) possiamo dunque continuare a dire che nulla nell'universo si crea o si distrugge, ma tutto cambia.

Il secondo principio della termodinamica, proposto nel 1868 da Rudolf Clausius, recita: "l'entropia dell'universo e di ogni sistema isolato tende ad aumentare".

Se consideriamo l'entropia una grandezza che misura in qualche modo la degradazione dell'energia, e se consideriamo che il calore è la forma meno nobile (più degradata) di energia, possiamo riscrivere il secondo principio con una formulazione meno ermetica, del tipo: "la degradazione di energia e, quindi il calore, tendono ad aumentare nell'universo e in ogni sistema isolato".

In realtà, molto si è discusso sul reale significato della parola e della grandezza fisica "entropia". Ma non c'è dubbio che essa misura, in qualche modo, lo stato di disordine di un sistema. Per cui il secondo principio della termodinamica prevede (e, quindi, impone) che il disordine cosmico e il disordine di qualsiasi sistema che, come l'universo, è isolato e non scambia né energia né materia con l'esterno, debba aumentare. Non c'è processo che non comporti, per un sistema isolato, un aumento di entropia.

E, quindi, di disordine.

Dal Big Bang all'origine della vita

La seconda legge della termodinamica non ammette deroghe.

Come è possibile, dunque, che dopo l'origine cosmica siano apparsi nell'universo l'ordine e la complessità? Come è possibile che, dieci miliardi di anni dopo il Big Bang, sulla Terra sia nata quella forma altamente organizzata di materia che è la vita? E come è possibile che, dopo ancora 4

miliardi di anni, siano nate quegli insiemi altamente complessi di forme altamente organizzata della materia che sono le società umane?

Non sono queste clamorose deroghe al secondo principio della termodinamica?

I fondatori della termodinamica si pongono ben presto questa domanda. E ben presto rispondono di no. Vediamo perché.

Sulla base dei due principi di conservazione dell'energia e di aumento dell'entropia, e della loro trattazione matematica rigorosa, i termodinamici riescono a creare una solida teoria scientifica degli scambi di energia. E a dividere i processi fisici in due grandi categorie, quelli reversibili e quelli irreversibili.

Cosa sia un processo reversibile, è presto detto. Ammettiamo di avere un gas compresso in un cilindro, chiuso di un pistone mobile che esercita una pressione costante sul gas di un'atmosfera. Se aumento la temperatura del gas nel cilindro, il pistone si muove e il volume occupato dal gas aumenta.

Se, poi, riporto la temperatura del gas al valore originario, il pistone, in modo del tutto spontaneo, ritorna a comprimere il gas nel volume originario.

L'espansione del gas nel cilindro è un processo reversibile.

Ora ammettiamo di avere, nella nostra stanza, una bottiglia di profumo chiusa ermeticamente. Se apro la bottiglia il profumo evapora, sia pure lentamente, fino a svuotarsi del tutto. Da quel momento potrò munirmi di tutta la pazienza dell'universo: non vedrò mai il profumo ritornare spontaneamente nella bottiglia. Se voglio di nuovo la fragranza in boccetta, dovrò compiere un lavoro suppletivo.

Bene, la termodinamica assicura che, al di fuori di poche condizioni ideali, i processi reversibili non esistono. Mentre in natura prevalgono, di gran lunga, i processi irreversibili. E, per di più, questi processi irreversibili sono anche direzionati: vanno tutti dall'ordine verso il disordine.

La teoria cinetica di Maxwell

Con queste sue proposte originali e, almeno in parte, inattese, nel XIX secolo la termodinamica si impone come una teoria solida, capace di mieterne successi paragonabili a quelli della meccanica, sebbene non utilizzi né gli apparati concettuali, né le grandezze fisiche fondamentali della meccanica.

A questo punto però sorgono due tipi di domande:

1) la termodinamica sancisce una cesura nella fisica o può essere ricondotta, in qualche modo, alla meccanica? E se, come tutti i fisici più o meno si aspettano, la risposta è affermativa, se la termodinamica altro non è che una branca della meccanica, come è possibile riportarle all'unità?

2) la termodinamica impone una direzione all'evoluzione cosmica, prevede una freccia direzionata del tempo, lungo la quale il disordine nell'universo deve (necessità) aumentare. In modo irreversibile. Ma le equazione della meccanica sono tutte rigorosamente reversibili rispetto al tempo. La meccanica non conosce la "freccia del tempo". E, allora, se la termodinamica è una branca della meccanica, dove nasce l'irreversibilità?

La risposta alla prima domanda viene data da James Clerk Maxwell con un articolo pubblicato nel 1860 sul *Philosophical Magazine*, dal titolo:

"Illustrazione della teoria dinamica dei gas". Un gas, sostiene Maxwell - riprendendo vecchie idee del matematico e fisico svizzero Daniel Bernoulli e, in definitiva, dello stesso Isaac Newton - è costituito da minuscole particelle che si muovono e si urtano in continuazione. La temperatura e la pressione di cui parlano i termodinamici altro non sono che una misura macroscopica dell'energia cinetica media posseduta dai costituenti del gas.

Insomma, i parametri termodinamici altro non sono che proprietà globali di sistemi costituiti da elementi che rispondono in tutto alle leggi della meccanica e che le leggi probabilistiche dei grandi numeri rendono estremamente precisi. D'altra parte, poiché seguire le traiettorie di queste particelle e gli scambi di energia conseguenti ai singoli urti non è praticamente e matematicamente possibile, i

parametri termodinamici, quali la temperatura e la pressione oltre che fornire indicazioni precise, matematicamente trattabili, , sono anche utili.

James Clerk Maxwell propone una "teoria cinetica" per dare un fondamento solido alla termodinamica e ricondurla nell'alveo della meccanica. Impresa notevole, visto che la teoria cinetica dei gas si fonda su un'ipotesi, quella atomica (atomo) e molecolare della materia, che non è stata ancora dimostrata e che autorevoli fisici e filosofi della natura, come l'austriaco Ernst Mach, rifiutano in toto. Impresa tanto più degna di attenzione, perché è proprio Maxwell, con la sua teoria elettromagnetica, a minare fin dalle fondamenta il progetto di ridurre l'intera fisica alla meccanica (meccanicismo).

Boltzmann e la forma del tempo

Malgrado la proposta, geniale, di Maxwell, resta ancora in piedi il secondo problema posto dalla termodinamica: l'aumento irreversibile dell'entropia: la freccia del tempo. La risposta viene dal fisico austriaco Ludwig Boltzmann e da quel suo famoso "teorema H" che potremmo considerare come uno degli atti fondativi di una nuova disciplina fisica, o, se si vuole, di una nuova versione della meccanica: la meccanica statistica.

In pratica, il "teorema H" di Boltzmann sostiene che l'irreversibilità della termodinamica è solo apparente. I processi termodinamici sono sempre processi reversibili. E quel profumo che fugge via dalla bottiglia e, anche se puoi attendere una vita, non lo vedi mai ritornare a riempirla? Beh, risponde Boltzmann, la fuga del profumo dalla bottiglia non è un processo irreversibile, è solo un processo che comincia con particolarissime condizioni iniziali, altamente improbabili, ma non impossibili da ripristinare.

La bottiglia del nostro profumo contiene miliardi e miliardi di corpuscoli che, come sostiene Maxwell, si muovono in modo casuale. La stanza che contiene la bottiglia contiene altri corpuscoli, di natura diversa e in numero ancora maggiore. Anch'essi si muovono in modo casuale. Se voi prendete tutti gli stati possibili che possono realizzare insieme i corpuscoli della stanza e i corpuscoli della bottiglia, vi accorgete che sono in numero enorme, ma finito. Lo stato particolare che prevede tutte i corpuscoli profumati nella bottiglia e tutti i corpuscoli non profumati fuori dalla bottiglia, è uno stato possibile, anche se, certo, altamente improbabile. Se partite da questa condizione iniziale particolarissima, è chiaro, statistica alla mano, che i corpuscoli profumati, agitandosi a caso, si disperdono nella stanza e voi perdetevi il vostro profumo. Tuttavia, se avete la pazienza di aspettare non per una vita intera, ma molto, molto di più, diciamo qualcosa come 1060 anni, quattro volte la vita finora vissuta dal nostro universo, vedrete che, per un istante e per puro caso, i corpuscoli profumati si ritroveranno tutti nella vostra bottiglia e i corpuscoli non profumati tutti fuori. Se sarete pronti a tapparla, quella bottiglia, avrete dimostrato che il profumo è tornato spontaneamente nella sua sede originaria. Insomma, l'irreversibilità della termodinamica è solo apparente: dipende dalle condizioni iniziali e dai tempi lunghi, straordinariamente lunghi, dei processi reversibili di cui si occupa.

Ma, allora, il secondo principio della Termodinamica, è infondato? Non è, dunque, vero che l'entropia aumenta in modo sistematico e ineluttabile? La domanda, per la verità, è ancora oggi fonte di dibattito scientifico.

Tuttavia Boltzmann sostiene (e la gran parte dei fisici conferma) che il secondo principio è valido, purché lo si interpreti correttamente. Che l'entropia è una grandezza reale, purché la si interpreti come misura di una tendenza: la tendenza, statistica, di un sistema termodinamico a evolvere verso una condizione di equilibrio. Condizione che, a sua volta, è semplicemente la somma degli stati più probabili. Insomma, l'entropia è una misura della tendenza omologatrice della natura. Una tendenza, appunto. Che è possibile cogliere quando sono in gioco i grandi numeri. Ma che non impedisce affatto fluttuazioni creative.

La crescita locale di ordine - di quell'ordine e, se volete, di quella complessità, che vediamo diffusi ovunque nel cosmo e in specie qui sulla Terra - è dunque un fenomeno che può avvenire senza

contravvenire all'imperativo categorico del secondo principio della Termodinamica. In alcuni dell'universo, sia in quelli aperti, che scambiano energia e materia con l'esterno, che in quelli chiusi, sottosistemi che scambiano solo energia con l'esterno, nulla, infatti, vieta che l'entropia possa diminuire. A patto che il processo relativo all'intero sistema isolato in cui il sottosistema è incluso, compori, comunque, un aumento di entropia.

Il futuro della Terra e quello dell'Universo

Un esempio chiarirà il concetto. Ammettiamo che il nostro sistema solare sia un sistema isolato da un punto di vista termodinamico. Nulla vieta che nel sottosistema termodinamico Terra si verifichi un processo costante di diminuzione dell'entropia, grazie al quale possono svilupparsi le strutture altamente organizzate che caratterizzano la vita.

Il nostro pianeta, infatti, è un sottosistema termodinamico aperto, che riceve e trasforma continuamente energia pregiata e un po' di materia dall'ambiente esterno (dal Sole in particolare) e restituisce energia degradata, insieme a un po' di materia, irradiandole nello spazio. Grazie, soprattutto, alla fotosintesi, l'energia radiante pregiata proveniente dal Sole si trasforma essenzialmente (ma non solo) nell'energia chimica e biochimica che consente la crescita, la conservazione, l'evoluzione di strutture molto ordinate, come gli organismi viventi. L'ordine sulla Terra aumenta, ma a scapito dell'intero sistema solare. Dove l'ordine complessivo, invece, diminuisce.

L'ordine può dunque esistere, localmente, anche in un universo dominato dal secondo principio della termodinamica. Ma è solo una fluttuazione statistica. Destinata, prima o poi, a essere riassorbita dal grande equilibrio, la morte termica, che è la condizione termodinamica stabile del cosmo.

A differenza degli scienziati dell'800, non spaventiamoci più di tanto a causa di questa desolante prospettiva. Perché quel "poi" può durare anche miliardi di anni. E può essere tirato in lungo e, al limite, indefinitamente da altre leggi fondamentali della fisica. Ma, al di là di ogni ipotesi sulle prospettive future e ultime dell'universo, resta il fatto che già nell'800 è risultato chiaro a tutti che la termodinamica non impedisce che l'ordine esista come stato locale metastabile e che la sua condizione di stabilità relativa possa protrarsi abbastanza a lungo da consentire l'evoluzione della materia così come la conosciamo. E da assicurarle una lunga vita organizzata.

Possiamo, a questo punto, saltare a piè pari dal XIX secolo agli anni '50 e '60 del XX secolo, quando, come dicevamo, tra i termodinamici aumenta l'attenzione per i processi irreversibili e per i sistemi cosiddetti lontanidall'equilibrio che producono aumento di ordine e di complessità.

L'attenzione si concretizza negli studi di "termodinamica di non equilibrio" condotti da una serie di scienziati, da De Groot a Kirkwood, da Katchalsky a Mazur. Ma soprattutto negli studi del norvegese Lars Onsager, insignito del premio Nobel nel 1968, e del belga di origine russa Ilya Prigogine, vincitore del Nobel nel 1977.

Prigogine e la teoria della complessità crescente

Ma qual è il contributo di Lars Onsager e di Ilya Prigogine, se tutti conoscono già l'esistenza di questa porta aperta nel secondo principio della termodinamica che consente il passaggio trionfale dell'evoluzione della materia verso strutture sempre più ordinate? Beh, in verità il loro contributo è essenzialmente tecnico. In fondo, la loro opera scientifica è consistita nel dimostrare, matematica alla mano, che solo le fluttuazioni termodinamiche che non si discostano molto dall'equilibrio tendono a esserrapidamente riassorbite. Mentre sono strutturalmente più stabili quei sistemi che si collocano molto lontano dall'equilibrio termodinamico. Sono questi sistemi i migliori candidati a partecipare al gioco dell'evoluzione della materia verso strutture sempre più organizzate. Ilya Prigogine li chiama "sistemi dissipativi", perché possono permettersi il lusso di produrre entropia negativa, detta anche neghentropia, insomma ordine,

dissipando a piene mani l'energia e l'entropia di una fonte gratuita, costante e lontana. La biosfera del pianeta Terra è il miglior esempio di sistema dissipativo: il flusso continuo di energia (e di materia) proveniente dal Sole, la mantiene stabilmente lontana dall'equilibrio termodinamico, cosicché essa può sbizzarrirsi nella creazione di neghentropia, sotto forma di strutture ordinate e di organismi viventi.

L'approccio di non equilibrio elaborato da Onsager e da Prigogine ha certamente ampliato la conoscenza termodinamica. Ma il suo impatto maggiore, forse, è stato di natura sociologica: è sembrato un metodo fisico-matematico utile a molti studiosi, soprattutto nelle discipline soft, dalla biologia all'ecologia fino alla sociologia, che hanno una strutturale difficoltà a matematizzare il loro percorso di conoscenza. Ha dato la sensazione, nel corso degli anni '50 e '60, di poter spiegare la crescita di ordine e di (auto) organizzazione ai livelli più vari. Tale sensazione è stata alimentata (e resa più confusa) a partire dagli anni '70 direttamente da Ilya Prigogine. Non tanto con la scuola chimico-fisica creata a Bruxelles, in Belgio, e ad Austin, nel Texas, ma soprattutto con la sua prolifica attività di divulgazione filosofica. Il Prigogine filosofo, molto più del Prigogine scienziato, è diventato il profeta di un nuovo principio fondamentale della fisica: universale, profondo e necessario quanto il secondo principio della termodinamica. Anche se a esso, talvolta, simmetricamente opposto. Il principio dell'autorganizzazione.

Entrambi, dunque, il Prigogine scienziato e il Prigogine filosofo, hanno dato il loro contributo alla creazione di un clima culturale culminato, verso la metà degli anni '80, nella esplicita ricerca di una teoria unificata della complessità crescente che, per analogia col secondo principio della termodinamica, potremmo chiamare "secondo principio della complessità".

Negli ultimi anni, infatti, Ilya Prigogine propone quei particolari sistemi termodinamici che lui definisce dissipativi come paradigma e base strutturale della complessità, di tutta la complessità, che incontriamo in natura. Tutto ruota, nella sua visione, intorno alle fluttuazioni, cioè a perturbazioni casuali che si verificano nei sistemi molto lontani dall'equilibrio termodinamico. La maggior parte delle fluttuazioni non determina cambiamenti radicali in un sistema dissipativo. Il quale resta, essenzialmente, uguale a se stesso fino a quando, in modo del tutto aleatorio, non interviene una fluttuazione critica. Questa è una fluttuazione capace di spingere il sistema dissipativo in un nuovo stato termodinamico, a entropia minore. Nel nuovo regime dinamico il sistema si trova, contemporaneamente, in una condizione di maggiore stabilità e di maggiore ordine. Così che le fluttuazioni critiche, sostiene Prigogine, possono essere considerate il motore dell'evoluzione in natura perché, attraverso un progressivo allontanamento dall'equilibrio termodinamico, determinano una crescita spontanea e stabile di organizzazione.

Non solo. Le fluttuazioni critiche sono anche alla base dell'irreversibilità e della mancanza di determinismo tipici, almeno secondo Prigogine, dell'evoluzione dei sistemi dinamici naturali.

Quando la struttura dissipativa, infatti, subisce una fluttuazione critica, il sistema viene sottoposto a una biforcazione: la sua traiettoria evolutiva giunge a un bivio e il sistema sceglie, in maniera del tutto aleatoria e quindi imprevedibile, una sola delle due o più strade che gli si aprono davanti.

Una nuova razionalità probabilistica

Per questo dobbiamo abbandonare ogni fiducia nella causalità rigorosa proposta dal determinismo e abbracciare una nuova razionalità che Prigogine definisce probabilistica. Il processo di biforcazione, infatti, viene descritto non da equazioni lineari, ma da equazioni stocastiche che danno adito a una serie di eventi possibili: uno solo dei quali, di volta in volta, si realizza.

Un esempio tipico dell'aumento spontaneo di complessità in regimi termodinamici lontani dall'equilibrio sono, secondo Prigogine, le celle di Bénard: l'emergere, oltre una soglia critica, di un moto collettivo e organizzato di molecole in un semplice liquido sottoposto a riscaldamento. O le reazioni chimiche cosiddette di Belusov-Zhabotinskij, con le loro spettacolari oscillazioni cicliche di colore, che rendono visibili le correlazioni a grande scala di un numero enorme di particelle e che si producono in fase liquide ogni qual volta si presentano certe condizioni, a

patto che la soluzione sia costantemente rifornita di reagenti (e quindi tenuta in condizioni lontane dall'equilibrio).

Le fluttuazioni critiche, le biforcazioni, le correlazioni e grande scale e le connesse transizioni verso regimi più organizzati, assicura Ilya Prigogine, non sono tipiche di sistemi fisici relativamente semplici come le celle di Bénard o di sistemi chimici moderatamente complicati, come le soluzioni di Belusov-Zhabotinskij, ma sono fenomeni generali che interessano tutti i sistemi lontani dall'equilibrio e caratterizzano l'evoluzione irreversibile e non deterministica. Caratterizzano la complessità dei sistemi naturali e delle sue dinamiche a tutti i livelli. Prigogine assicura di essere ormai in possesso della teoria, matematizzata, che lo dimostra (si veda il suo libro più recente, *La fine delle certezze*, Bollati Boringhieri, 1997).

In realtà i processi studiati da Ilya Prigogine sono un esempio di autorganizzazione e, se volete, di complessità che si manifestano in molti sistemi fisici e chimici lontani dall'equilibrio termodinamico. Ma difficilmente possono rappresentare, come vorrebbe il suo autore, un modello fisico per strutture ben più complesse, quali gli organismi viventi o le società umane. Il tentativo prigogineiano di proporre il suo modello come paradigmatico della complessità è decisamente contestato. E non solo dall'esterno del mondo di chi studia i sistemi complessi. Il Premio Nobel Murray Gell-Mann, leader del gruppo di Santa Fe che può essere considerato il concorrente diretto della scuola fondata da Prigogine a Bruxelles, non degna neppure di una citazione il Premio Nobel Prigogine nel suo recente libro sulla complessità e sui suoi studiosi. Il fisico teorico Marcello Cini, tra i massimi esponenti della complessità italiana, rileva che i fenomeni studiati da Prigogine: "restano nell'ambito dei fenomeni completamente descrivibili nel linguaggio della chimica e della fisica". Mentre i teorici dell'informazione rilevano che la correlazione che Prigogine effettua tra sistemi molto lontani dall'equilibrio e sistemi complessi non è affatto universale. Molti sistemi del tutto caotici, nel senso di disordinati, dissipano entropia quanto e più di molti sistemi complessi. E spesso la complessità di un sistema cresce senza che la sua entropia diminuisca. D'altra parte nessuno è riuscito a unificare la teoria dell'informazione di Shannon e la termodinamica in una nuova teoria più generale della complessità fondata sui concetti di energia e informazione. Dal che i teorici dell'approccio cibernetico ne deducono che la via maestra che porta alla soluzione del problema complessità non può essere quella termodinamica.

Insomma, la vera complessità non è nelle strutture dissipative ma altrove.

Chi scrive pensa, invece, che Prigogine colga nel segno. Ancorché in un segno molto parziale. Alcuni fenomeni di organizzazione spontanea, o di autorganizzazione che dir si voglia, possono essere spiegati dalla termodinamica di non equilibrio. Si tratta dei fenomeni legati a quel tipo di complessità che Warren Weaver definiva "disorganizzata", e che noi potremmo definire, primitiva, rudimentale o, se ci si passa la contraddizione in termini, semplice. La termodinamica di non equilibrio è un ottimo strumento per descrivere, con una razionalità probabilistica, la dinamica dei sistemi a complessità disorganizzata.

Certo questa complessità analizzata e descritta mediante i sistemi termodinamici fisici e chimici molto lontani dall'equilibrio studiati da

Prigogine non ha nulla a che fare con l'ordine dei sistemi biologici o dei sistemi sociali. I sistemi di non equilibrio à la Prigogine rappresentano una parte (solo una parte) della complessità che si riscontra al livello fisico e chimico di organizzazione della materia. È ancora tutto da dimostrare che la teoria dei sistemi dissipativi o una qualsiasi altra teoria matematizzata possa descrivere quelli che Weaver definiva i "sistemi a complessità organizzata".

Sistemi la cui complessità è segnata dall'istoria. E la cui evoluzione, quindi, può essere spiegata a posteriori.

Ma difficilmente può essere prevista con un algoritmo, con qualsiasi algoritmo.