

IGNAZIO LICATA

INCERTEZZA.
UN APPROCCIO SISTEMICO

La ricerca dell'indeterminato diventa l'osservazione del molteplice, del formicolante, del pulviscolare.

Italo Calvino

La differenza essenziale da rilevare è nell'attribuzione del «perché»: non cerco perché il fatto che io prevedo accadrà, ma perché io prevedo che il fatto accadrà.

Bruno de Finetti

1. *Introduzione: la triade della potenza e dell'incertezza*

I termini incertezza, caso e probabilità si pongono, per così dire, *di traverso* a tutta la mitologia popolare legata all'idea di scienza. In particolare alla triade «amletica»¹ si oppone quella della «potenza», costituita da certezza, causa e predicibilità. In base alla capacità di una disciplina di offrire più ingredienti di esattezza (identificazione di catene causali in grado di assicurare previsioni precise) e meno di incertezza, si fa rientrare un'attività cognitiva nella definizione di scienza e si relega il resto nel campo dell'opinione e della soggettività. Al più si ammette che l'indeterminazione² è un fatto di limitazioni «pratiche» nella modalità di acquisizione di una certa quantità di informazione, ed è connessa dunque non tanto al conoscibile teorico quanto alla pratica necessariamente «sporca» delle applicazioni. Si fa

¹ Il riferimento è alla singolare rivisitazione del monologo di Amleto in Reichenbach [2002].

² Useremo qui il termine in senso generale, come assenza di determinazione precisa del valore di un osservabile. Più avanti riprenderemo il termine in relazione ai temi della fisica quantistica.

un'eccezione per la fisica quantistica, dove si ammette un qualche fattore «intrinsecamente casuale» e dunque «di principio». In questo saggio vorremmo capovolgere tale visione e suggerire buoni motivi per sostenere che l'incertezza, e le strategie per gestirla, sono *parte costitutiva ed essenziale della conoscenza scientifica*, non meno che del quotidiano orientarsi nel mondo, e che la mitologia della potenza è basata su una valutazione errata delle effettive procedure metodologiche della pratica della scienza. In un certo senso, l'incertezza è complementare all'acquisizione d'informazione come l'ombra lo è della luce. Vedremo inoltre che l'indeterminazione quantistica ha un significato assai meno vago e impenetrabile di ciò che comunemente si ritiene. Faremo questo con gli strumenti della fisica teorica, convinti che la riflessione epistemologica non è un momento «esterno» all'indagine scientifica ma una componente critica indispensabile del suo farsi. In altre parole, soltanto una conoscenza ravvicinata dell'attività scientifica e dei suoi problemi può metterci in grado di valutare limiti e fecondità di uno scenario teorico e dei possibili approcci modellistici a una classe di eventi.

A questo fine, sarà utile adottare un approccio sistemico in grado di comprendere il ruolo attivo dell'osservatore e il tipo di corrispondenza operativa tra scenari teorici, costruzione di «modelli» e «classi di eventi osservati». In altre parole la visione sistemica permette una «de-ontologizzazione» degli asserti della scienza, contestualizzandone le procedure all'interno del dipolo inscindibile *osservatore-osservato* [Caianello 1992]. In particolare, l'aumento della *complessità* del sistema studiato si traduce nella pluralità delle scelte descrittive possibili [Licata 2011a; 2012a].

Già da queste poche osservazioni è possibile comprendere che l'incertezza è un *ospite inatteso* quando si mette l'osservatore *tra parentesi* e lo si allontana asintoticamente dai processi studiati verso l'onniscienza dell'occhio di Dio e del demone di Laplace, ipotizzando che il mondo sia *già lì*, con proprietà fisse e definite, strutturato in livelli saldamente incapsulati uno dentro l'altro. Un osservatore onnisciente può esplorare ogni livello e riprodurlo fedelmente sulla mappa/modello che alla fine sarà connessa come il tassello di un puzzle alle altre in una super rappresentazione in grado di offrire una «teoria del tutto». In questo *Theatrum Mundi* l'incertezza non ha spazio, ma viene progressivamente eliminata man mano che l'indagine scientifica satura l'informazione di ogni livello e si avvicina alla rappresentazione «finale» nella quale

l'incertezza può avere soltanto una parte minore per motivi, ad esempio, di complessità computazionale, né più né meno ciò che accade su una scacchiera, gioco teoricamente «finito» dove la strategia del giocatore umano è soltanto l'espressione cognitiva dei suoi limiti combinatori.

Questa concezione ha radici antiche e ritrova in ogni fase culturale nuove giustificazioni. Tra quelle più antiche va sicuramente citato l'ormai famosissimo demone di Laplace, metafora della fisica newtoniana e di ogni forma «pratica» di limitazione, come nella teoria cinetica dei gas dove il ricorso alla probabilità è una misura della nostra ignoranza/impossibilità di ottenere informazioni sul moto di ogni singola molecola. Il grande successo di L. Boltzmann, J.C. Maxwell e J.W. Gibbs nel connettere le osservabili macroscopiche della termodinamica con quelle microscopiche dei gas perfetti utilizzando l'approccio probabilistico alla teoria cinetica [Bohm 1957], è rimasto a lungo il modello insuperato del modo di intendere l'incertezza e la casualità come inevitabili conseguenze dell'inaccessibilità alle informazioni microscopiche del sistema. Secondo questa concezione l'indeterminato compare nelle nostre descrizioni del mondo come qualcosa che non contrasta idealmente con la completa specificazione di ogni livello informativo, ma che è troppo gravoso, e alla fine dei conti inutile, per richiedere in pratica lo sforzo di inventare strumenti teorici e sperimentali in grado di offrire l'«alta risoluzione» richiesta. Di più, il successo della teoria cinetica e il suo paradigma sull'incertezza sembrano offrire, seppur velato dalle procedure probabilistiche, un ulteriore sostegno alla metodologia riduzionista che animava la fisica newtoniana: ogni comportamento collettivo e macroscopico può essere ricondotto, con opportune strategie, all'informazione microscopica relativa ai costituenti del sistema. Nasce così l'idea di una «teoria finale» in cui ogni livello del mondo è connesso agli altri attraverso catene logico formali; in particolare ogni livello è alla fine riconducibile ai comportamenti microscopici di quei «mattoni del mondo» che si sono oggi spostati dall'atomo democriteo alle entità esotiche della gravità quantistica.

Un corollario concettuale importante di queste posizioni è che ogni disciplina che non è in grado di connettersi a questa catena logica è una scienza *soft*, una conoscenza non compiutamente scientifica che gestisce in modo pragmatico concetti vaghi o nel migliore dei casi euristici. Le scienze *soft* sono dunque costitu-

zionalmente afflitte da incertezza perché incapaci di rientrare nella «sintassi universale» che connette il micro al macro. Ci sono naturalmente vari livelli di *soft-titudine* che vanno dalla biologia, i cui «oggetti» rientrano ampiamente in una descrizione fiscalista (anche se la questione diventa più problematica per le manifestazioni e i comportamenti del vivente!), fino alla psicologia e sociologia, irrimediabilmente vaghe perché sia gli oggetti che i comportamenti studiati appaiono inconciliabili con un vocabolario riduzionista di ispirazione fiscalista.

L'apparente cristallina chiarezza di questo ragionevole quadro è stata erosa dallo sviluppo della fisica dei sistemi collettivi, e si può datare la nascita ufficiale di una nuova consapevolezza epistemica con la pubblicazione, nel 1972, del celebre articolo di un guru della fisica come Philip W. Anderson [1972; 2011] i cui temi saranno poi ripresi e sviluppati da un altro premio Nobel, Robert Laughlin [Laughlin e Pines 2000; Laughlin *et al.* 2000]. In questi lavori si fa notare come non è tanto il riduzionismo a essere un problema – per quanto un'idea ingenua dei costituenti «elementari», il famoso «è fatto di», è assai grossolana rispetto alla straordinaria varietà dei comportamenti del mondo fisico – quanto l'ipotesi sotterranea e inversa sottesa al riduzionismo, quella che Anderson chiama «ipotesi *costruzionista*». In altre parole non è affatto vero che dall'informazione microscopica relativa ai costituenti si possa sempre dedurre ogni manifestazione della materia. Proprio la ricchezza dei comportamenti studiati dalla *many body physics* mostra che: «The behavior of large and complex aggregates of elementary particles, it turns out, is not to be understood in terms of a simple extrapolation of the properties of a few particles» [Anderson 1972]. Esempi ormai classici sono il fonone, il quanto di vibrazione in un reticolo cristallino, che non può essere in alcun modo considerato un «costituente» del cristallo e tanto meno può avere una qualche esistenza separata dal processo da cui emerge; o la coppia di Cooper, che non è «fatta da» due elettroni (fermioni), ma è un particolare stato quantico bosonico che si forma al di sotto di una temperatura critica nei superconduttori [Del Giudice 2010]. Al di là di questi semplici esempi tratti dalla fenomenologia della materia condensata, in questa direzione va anche gran parte della ricerca sui processi di auto-organizzazione e sulle transizioni di fase, mostrando che la catena della predicibilità riduzionista si inceppa su problemi di scala e complessità [Licata e Sakaji 2008]. In altre parole, ad

ogni livello³ emergono comportamenti che richiedono nuove strutture concettuali, *compatibili ma non riducibili* ad altri livelli! In questo senso, sottolinea Anderson, la psicologia non è «nient'altro che» biologia applicata, così come la biologia non è «solo» chimica applicata, benché le strutture cognitive non possono esistere senza un *embodiement* biologico (come hanno mostrato anni di ricerca sull'intelligenza artificiale!), e le forme viventi scaturiscono dalle possibilità permesse dalla fisico-chimica che le sostiene e alimenta. In particolare, la fisica dell'emergenza e dei sistemi complessi chiama in gioco non soltanto le «leggi», ma le *condizioni al contorno* che veicolano l'azione delle leggi, il *qui e ora* di *quel* fenomeno.

Inizia così a delinearsi un quadro che va oltre le «ragionevoli» ambizioni della fisica classica di stampo riduzionista, un quadro più realistico dove la predicibilità «meccanica» universale di Laplace viene delegata definitivamente a un *demone-osservatore* che conosce non soltanto le «leggi», ma ha anche accesso a ogni possibile livello e condizione al contorno, e alla pluralità degli eventi che da questi scaturiscono, e così via per ogni nuovo livello e ogni nuova condizione al contorno, in una esplosione combinatoria di biforcazioni. Per il demone di Laplace, astorico e disincarnato, l'intera evoluzione e tutte le forme viventi sono «predicibili», e di fatto non esistono fenomeni genuinamente «emergenti», dunque non esiste incertezza. Ma per il costruttore di modelli, l'osservatore situato nello spazio e nel tempo, l'orizzonte dell'efficacia del suo modello, l'emergenza che è in grado di rilevare e l'incertezza che si trova a gestire sono profondamente interconnesse tra loro dalle sue *scelte sistemiche*. Per comprendere l'incertezza dobbiamo perciò comprendere l'emergenza, della quale appare in qualche modo *gemella*, e le sottili trame metodologiche che legano entrambe al concetto di modello.

2. *Concrezioni di mondo: sistemi e idealizzazione*

Fedeli alla *pratica* della fisica vogliamo iniziare una rapida ricognizione della sistemica suggerendo al lettore qualche riflessione etimologica sul senso «artigianale» del concetto di modello.

³ «Livello» non è da intendersi in senso «oggettivistico» ma, come vedremo più avanti, qualcosa che si definisce in relazione alle scelte dell'osservatore.

Partiamo proprio dall'immagine del *modellare* che evoca inevitabilmente l'attività dello scultore che lavora con la creta. Nella voce della Treccani troviamo un gran numero di spunti:

a) *corrispondenza vincolata a scelte*: «In genere, qualsiasi oggetto reale che l'artista si propone di ritrarre, o che un artigiano, un operaio abbia dinanzi a sé per costruirne un altro uguale o simile, con la stessa materia o con materia diversa, nelle stesse dimensioni o in dimensioni diverse: studiare, analizzare, interpretare, ritrarre il m.; copiare fedelmente il m.; attenersi al modello. In sartoria, foglio di carta (detto più specificamente cartamodello) opportunamente sagomato secondo le linee di un indumento e più spesso delle singole parti di questo (davanti, dietro, maniche, ecc.), che serve da guida al sarto o alla sarta per il taglio del tessuto»;

b) *provvisorietà*: «Nella scultura, anche l'esemplare di un'opera, foggiate in creta, gesso, cera o altra sostanza plastica e condotto a termine in ogni sua parte, destinato a servire di base all'esecuzione definitiva dell'opera stessa quando questa dovrà essere tradotta in altro materiale (marmo, pietra) o fusa in bronzo»;

c) *criteri di aderenza*: «quadro somigliantissimo al m.»;

d) *universalità*: «qualsiasi cosa fatta, o proposta, o assunta per servire come esemplare da riprodurre, da imitare, da tener presente per conformare ad esso altre cose: le domande vanno redatte secondo il seguente m.; m. di rilegatura di un libro; m. di traduzione dal latino; cosa scelta come esempio da seguire e da imitare, spec. dal punto di vista intellettuale».

Queste voci possono essere immediatamente trasferite all'attività scientifica se correttamente considerata nell'ottica dell'idealizzazione [Coniglione 2011] e della sistemica [Minati e Guberman 2007]. Un modello è qualcosa che «si adatta a», più o meno provvisoriamente, incontro tra un «corpo» di eventi e le strategie richieste dal loro «ritratto». Quando studiamo scientificamente una classe di eventi concentriamo la nostra attenzione su un *pezzo di mondo* opportunamente identificato e *messo a fuoco* attraverso una serie di attività cognitive via via più raffinate secondo uno spettro che va dall'osservazione empirica fino alle procedure operative e di formalizzazione che trasformano l'insieme dei dati di partenza in un *sistema*, secondo la classica definizione di Hall e Fagen «un insieme di oggetti e di relazioni tra loro e i loro attributi» [Pessa 1991]. Non si finirà mai di sot-

tolineare quanto una definizione apparentemente così semplice sia concettualmente densa e contenga un gran numero di insidie teoriche! Richiamiamo l'attenzione del lettore su quest'atto di *hybris*, necessario per passare da un'osservazione empirica passiva a una descrizione attiva dei processi del mondo: abbiamo identificato oggetti caratterizzati da *proprietà*, costruendo dunque delle «osservabili», e un insieme di relazioni dinamiche strutturanti che corrispondono al sistema studiato e definiscono un confine ideale tra il sistema e l'*ambiente*. Questo implica la possibilità di descrivere attraverso un insieme di relazioni, parametri e condizioni l'influenza dell'ambiente esterno sul sistema, e viceversa. Le relazioni che legano tra loro le osservabili e descrivono le interazioni tra gli oggetti e più in generale tra sistema e ambiente sono globalmente dette il *modello* del sistema⁴.

La pratica scientifica mostra chiaramente che non esiste alcuna *via regia* in grado di farci passare da un groviglio di processi reali a una descrizione modellistica. La definizione di un sistema è sempre l'*atto fondante di una scelta cognitiva*, e non può essere disgiunto dalla valutazione dei criteri scelti dal costruttore di modelli che seguono le indicazioni artigianali già menzionate sopra. Si tratta di un'operazione estremamente sofisticata in cui si tenta di cogliere gli aspetti *strutturali* di un fenomeno, eliminando idealmente manifestazioni spurie e controllando l'influenza ambientale. La formulazione della legge d'inerzia da parte di Galileo è un esempio magnifico di applicazione dell'idealizzazione sistemica che porta a un risultato «paradossale» per la fisica aristotelica [Frova e Marenzana 2011]. Un modello, insomma, realizza una sorta di *occhiale cognitivo* che in virtù della sua astrazione ci permette di studiare intere classi di eventi; è, per usare una felice espressione di Italo Calvino, una *concrezione del mondo* [Calvino 2000; Piacentini 2002].

Va da sé che ci aspettiamo che il modello mostri una qualche universalità, sia in grado cioè di *reggere* (come si usa dire nel linguaggio dei fisici), un'intera classe di eventi simili. Non si

⁴ Non ci dilungheremo qui sul tema della distinzione tra *teoria* e modello. Per i nostri scopi sarà sufficiente intendere la teoria come un *corpus* modellistico storicamente stratificato e validato che guida la costruzione di nuove rappresentazioni. In fisica esempi tipici sono i principi generali della relatività ristretta e della meccanica quantistica. Ovviamente il costruttore di modelli non ha sempre a disposizione un bagaglio teorico così solido e formalizzato.

tratta di valutare la sua «verità» quanto la sua *fecondità* nel darci forme di comprensione teorica e operativa del sistema studiato. Tra queste sicuramente la predicibilità gioca un ruolo importante, ma non bisogna dimenticare che la capacità predittiva è sempre relativa soltanto ad alcune osservabili del modello, e raramente riesce a «coprire» ogni aspetto dell'evoluzione del sistema. Se in linea teorica questo era possibile nella meccanica newtoniana (e lo è di fatto in ogni sistema dove la si è potuta applicare, come la meccanica razionale e le osservazioni astronomiche), questo è stato possibile soltanto in virtù del fatto che nel mondo di Newton gli oggetti sono semplici e completamente definiti da un piccolo insieme di proprietà.

Seppure fosse possibile realizzare il programma del demone di Laplace, in un mondo siffatto non accadrebbe nulla e non ci sarebbe nulla da predire! Le particelle interagirebbero tra loro attraverso urti elastici con una distribuzione gaussiana appena temperata da piccoli addensamenti locali e fluttuazioni. Su tempi lunghissimi, detti di Poincaré, si ripresenterebbero determinate configurazioni macroscopiche (per un insieme di N particelle, il tempo di ricorrenza di Poincaré è di e elevato a N), ma il demone, con la sua attenzione esclusiva ai costituenti, non riuscirebbe a vederle. Per comprendere l'importanza dell'introduzione dell'ambiente e dunque di condizioni al contorno che vincolano e veicolano i comportamenti fisici, consideriamo un gas perfetto in una boccetta che viene poi aperta. Il moto browniano spingerà progressivamente il gas fuori dalla boccetta attraverso un processo di diffusione fino a saturare l'ambiente. Questo processo entropico resterebbe «invisibile» agli occhi riduzionisti del demone, che vedrebbe sempre e soltanto urti tra particelle. Certo, potremmo ammettere che il demone è in grado di definire e seguire più scale e comportamenti simultaneamente, ma al di là della *demonologia scientifica* la questione rilevante è che *osservabili diverse segnano storie diverse* del sistema, e persino nei casi più semplici, come quelli finora illustrati, non è possibile una convergenza perfetta tra livelli descrittivi. È vero ad esempio che la teoria cinetica ha stabilito un saldo *ponte concettuale* tra micro e macro, ma che senso avrebbe il concetto di entropia per un sistema costituito da una *singola particella*? Anche nei casi in cui il determinismo di ispirazione riduzionista non viene scalfito concettualmente, come accade nei processi caotici e non-lineari, dove è sempre assicurata la possibilità di seguire *step-by-step* la traiettoria del

sistema nello spazio delle fasi (purché con pochi gradi di libertà), più che una predicibilità in dettaglio è molto più interessante cercare di identificare stati asintotici, attrattori e configurazioni d'equilibrio che riguardano i comportamenti collettivi globali e sono indispensabili per lo studio dei processi di auto-etero-organizzazione [Auyang 1999; Scott 2007]. A questo punto ci si potrebbe chiedere se, pur perdendo i dettagli della predicibilità in termini di costituenti, è possibile salvare il concetto di gerarchia. Ad esempio, possiamo immaginare che la complessificazione di un sistema venga descritta da una catena di modelli, passando da un livello ad un altro attraverso processi simili alle transizioni di fase con rottura di simmetria? La questione è fortemente dibattuta, ma la risposta sembra essere ampiamente negativa per i limiti delle teorie di transizione di fase sia classiche che quantistiche. La difficoltà principale risiede nell'incapacità del *corpus* teorico attuale di trattare in modo unitario, in uno stesso scenario, le interazioni sistema-ambiente in modo da render conto di come si modificano entrambi generando *processi di emergenza*. In altre parole, ci scontriamo con quell'*artificiosità* della distinzione tra sistema e ambiente che pure ha alimentato l'intera evoluzione della fisica! In particolare, va ricordato che durante le loro *evoluzioni intrecciate*, sistema e ambiente producono *regimi transitori* estremamente complicati, *variabili configurazionali* di tipo *mesoscopico* che guidano i componenti del sistema verso nuove forme di organizzazione e in generale *vincoli*, condizioni stabili o meta-stabili che caratterizzano la *storia* del sistema. Durante questo processo possono fare la loro comparsa nuove osservabili e altre sparire; cambia dunque l'*organizzazione strutturale* del sistema e il suo modo di *gestire informazione*. Si potrebbe anche aggiungere, pensando ai domini biologici e cognitivi, che nei processi d'emergenza cambiano le *dinamiche funzionali* e i *domini semantici* del sistema e che questo potrebbe essere alla fine il vero limite estremo del programma riduzionista. In casi di alta complessità, infatti, non soltanto viene meno la predicibilità in dettaglio, ma la stessa ricerca di caratterizzazioni globali degli stati asintotici appare di limitato interesse se non è coniugata ad una comprensione del *significato* di una certa classe di comportamenti per il sistema in esame [Pessa 2006; 2009; Licata 2011b].

Si può qui soltanto accennare al formidabile problema della *coerenza*. L'emergenza e la comparsa di nuovi stati organizzazionali si mostra il più delle volte come la manifestazione di una

forma coerente in grado di rendere il sistema selettivamente dipendente dagli input ambientali assicurandogli così una certa autonomia. Si comprenderà dunque che un'analisi esauriente di queste caratteristiche implicherà non soltanto una descrizione delle nuove strutture dinamiche in termini di informazione sintattica, ma dovrà includere una descrizione dei processi di *appropriazione semantica* dell'informazione da parte del sistema, ossia una comprensione delle relazioni plurali struttura/funzione, o, se si vuole, una *comprensione della «comprensione»* del sistema [Cariani 2009; Arecchi 2008]⁵!

L'unica teorizzazione in cui un programma di ispirazione riduzionista sembra aver avuto successo è la «torre» delle *effective quantum field theories*, una descrizione della fisica delle particelle dove ogni livello energetico è «impilato» negli altri, e dove acquista in qualche modo un senso preciso l'espressione «Y è costituito da X» (ad esempio, un adrone è «fatto» di quarks) [Hartmann 2001; Castellani 2002]. Fuori da questa sintassi, è possibile far rientrare in un quadro modellistico unitario i fenomeni di *pattern formation* studiati nelle strutture dissipative di Ilya Prigogine o che seguono lo *slaving principle* della sinergetica di Hermann Haken [2005]. Sono casi in cui è possibile, seppur con raffinati strumenti matematici, fare predizioni sullo stato asintotico del sistema a partire dal modello formale, e sono perciò classificabili come *emergenza modellizzabile*. In tutti gli altri casi, che comprendono in pratica la stragrande varietà dei fenomeni che ci circondano, viene meno la possibilità di una descrizione modellistica univoca *per via della natura e dell'evoluzione del sistema stesso*. Tutto questo suggerisce una *emergenza radicale o osservazionale* che richiede una descrizione *plurimodellistica*, dove ogni modello è mirato allo specifico aspetto che si vuole cogliere. Il vecchio concetto di «livello» è così sostituito dall'esplicitazione dell'obiettivo modellistico in *scopi, risoluzione e scelta delle osservabili* [Goldstein 1999; Ronald *et al.* 1999; Ryan 2006]. Siamo così pronti ad accogliere l'incertezza non solo come «limitazione» ma come componente

⁵ La nozione di appropriazione semantica realizza in stile sistemico l'idea di Peirce che tra un segno e un oggetto c'è un flusso d'interpretanti con uno spettro continuo che coinvolge in modo variamente sovrapposto la «logica», che viene così a essere un costruito storico, le dimensioni organico-sensoriale, emotiva, «energetica» [Peirce 2008].

fondamentale di una teoria generale dell'emergenza e dei rapporti osservatore-osservato.

3. *L'importanza di osservare «al contorno»*

La teoria dell'apertura logica nasce all'interno della tradizione sistemico-cibernetica per analizzare come il *paesaggio modellistico* connesso alla descrizione di un sistema con forti emergenze si complessifica con la riorganizzazione informazionale del sistema nel corso delle sue storie evolutive [von Foerster 1987; Minati *et al.* 1998; Licata 2008a]. In particolare, è centrale nella teoria il concetto di *vincolo* per connettere la fisica del sistema alla sua capacità di gestire informazione⁶. Senza entrare nel dettaglio degli aspetti formali, ci limitiamo a ricordare che se un sistema è in grado di mantenere una struttura sufficientemente articolata e ampiamente autonoma nel corso della sua storia termodinamica con l'ambiente, deve poter resistere alla dissipazione, e questo è possibile se un insieme di vincoli agisce come «dispositivo» di *contenimento entropico*⁷. Allo stesso tempo i vincoli caratterizzano il modo peculiare di processare informazione ambientale e «fotografano» il correlato fisico della struttura organizzativa del sistema.

Tra i vincoli ci saranno quelli *frozen*, stratificati e stabilizzati nel tempo, che costituiranno così lo *scheletro strutturale* del sistema, quelli metastabili o transitori, che reggono equilibri su scale temporali diverse, e quelli «contingenti», che rappresentano il *qui e ora* della relazione tra il sistema e l'ambiente. Il discorso sui vincoli ci riporta all'importanza cruciale delle condizioni al contorno, e ai limiti di quelle «leggi universali» a cui troppo spesso si delega, in modo unilaterale e metodologicamente scorretto, il

⁶ Il concetto di *vincolo* è legato in modo naturale a quello di *codice variabile*, di importanza fondamentale nelle ricerche sulla *computazione naturale* [Licata 2008a, cap. 6].

⁷ Con il termine *vincolo* qui indichiamo ogni tipo di informazioni sulle relazioni sistema/ambiente, come condizioni al contorno, leggi di bilanciamento, confini variabili, parametri, e così via. In genere, ben pochi di questi vincoli possono essere *descritti* matematicamente, in modo astratto, perché nei casi di autentica complessità, come avviene nei processi biologici e cognitivi, mostrano *l'inestricabilità della struttura dalle dinamiche* in un sistema complesso [Giuliani 2011].

compito di dare una «descrizione» del mondo. Una legge fisica descrive *soltanto* classi di eventi, è necessario poi integrare le leggi con i vincoli specifici tramite i quali (e grazie ai quali!) si realizza il singolo evento per averne una piena comprensione. Le equazioni *reggono* i fenomeni nel senso che individuano una *griglia di possibilità* per gli eventi fisici, ma sono i vincoli specifici poi a fissare la situazione in cui l'evento singolo si realizza effettivamente. Chi pensa erroneamente di poter affidare la descrizione di «ogni cosa» a un *set* di equazioni rischia di confondere l'*accidentale* con il *superfluo* in un eccesso di platonismo matematico, ma è Aristotele a ricordarci che è proprio ciò che accade nel tempo, e può essere osservato, a dare un senso compiuto alle «leggi». Non soltanto l'approccio sistemico ci ricorda che la mappa è *man made* e non è il territorio, ma l'importanza delle condizioni al contorno sottolinea che l'uso proprio della mappa non è quello di tentare di dedurre da questa il destino di ogni singola traiettoria! Naturalmente è possibile nei casi più semplici, come le particelle newtoniane, dove bastano le condizioni iniziali (o un minimo scarto su queste nei fenomeni caotici) per fissare univocamente la dinamica, o nei sistemi dissipativi, dove come condizioni al contorno basta specificare un dominio spazio temporale e un *range* parametrico. Ma più aumenta l'ordine di complessità – pensiamo agli organismi viventi –, più è decisiva l'importanza delle contingenze, ossia di quelle catene di eventi correlati al sistema non soltanto dal punto di vista della *forma* delle relazioni ma anche del loro *significato*. Se *la natura ama nascondersi* (Eraclito, fr. 116 = DK, 22 B 123), sono le contingenze a rivelarci che si nasconde nei dettagli.

A questo punto è necessario introdurre un'ulteriore distinzione tra *dinamica* e *storia*. I sistemi dinamici sono descritti da traiettorie in un opportuno *spazio delle fasi*⁸, ma la dinamica da sola non include una distinzione tra il prima, il dopo e l'irreversibile cambiamento del sistema. Come nel caso del gas nella boccetta, un osservatore che facesse girare al contrario il «film» del moto di ogni singola molecola non vedrebbe nulla di strano, nessun «prima» e nessun «dopo». La freccia del tempo, la storia e l'improbabilità degli eventi visti nel film proiettato in senso

⁸ Ricordiamo la difficoltà matematica di rappresentare spazi delle fasi di elevata dimensionalità, sono necessari strumenti piuttosto raffinati per trattare i sistemi caotici con poche variabili.

inverso entrano in gioco soltanto con le condizioni al contorno. L'approccio dinamico si limita ad associare un orologio ai gradi di libertà del sistema, ma è insufficiente per misurarne i cambiamenti strutturali globali, per cogliere i quali è necessario invece andare a osservare quella *stratificazione/modificazione dei vincoli* che è appunto la *storia del sistema*. Questo, per inciso, è il motivo per cui una descrizione puramente dinamica fallisce con i fenomeni storici, come la vita, il linguaggio e la conoscenza [Ceruti 2009].

4. *La via regia dell'incertezza*

Un sistema ad alta apertura logica è un sistema in cui un grande numero di vincoli realizza un compromesso con l'ambiente tale da garantire autonomia organizzazionale, adattività e sensibilità al *qui e ora*. L'inter-relazione con l'ambiente è dunque molto stretta, selettiva ed altamente variabile, e corrisponde all'*accoppiamento strutturale* di Maturana e Varela [1980]. Possiamo pensare ai vincoli come a *meta-regole* che descrivono il *gioco informativo* tra sistema e ambiente. Naturalmente, più il sistema è complesso più mostrerà emergenza intrinseca e una forte variabilità delle meta-regole. In pratica, i vincoli si producono e si modificano seguendo una logica di processo. Costruire un modello per sistemi di questo tipo significa operare una partizione all'interno di un processo, selezionando alcune caratteristiche relazioni sistema/ambiente tramite un insieme di n meta-regole. Parliamo in questo caso di *modello ad apertura logica di grado n* .

È facile dimostrare, anche se non lo faremo qui, due risultati fondamentali:

a) è impossibile descrivere un sistema logicamente aperto tramite un solo modello formale;

b) le descrizioni di un sistema logicamente aperto tramite un modello di grado n e di grado m , con $m \neq n$, non sono necessariamente coerenti.

Non sorprende l'analogia con i famosi teoremi di Gödel-Turing, che riguardano infatti i limiti del programma di «compressione assiomatica» del *corpus* di conoscenze matematico proposto da D. Hilbert e possono intendersi, in accordo con Chaitin, dicendo che *la matematica è un sistema aperto*, più simile a un organismo che si arricchisce di nuovi rami imprevedibili che al gioco degli

scacchi. E questo avviene perché i matematici non sono meri manipolatori di informazione sintattica, ma *creano e gestiscono significati* [Licata 2008a; Wang 1997; Chaitin 2007]. Tornando ai risultati sui sistemi aperti essi possono sintetizzarsi dicendo che per un sistema complesso che esibisce molti comportamenti emergenti dovrà essere utilizzato un *approccio plurimodellistico*, dove ogni modello, ispirato ad uno specifico insieme di meta-regole, è mirato a cogliere certi aspetti del sistema e non altri [Minati 2009]. La discussione sul riduzionismo e sui livelli ci rende più facile comprendere intuitivamente il senso del secondo risultato. L'emergenza richiede all'osservatore una scelta di obiettivi e una conseguente adozione di osservabili con un grado di risoluzione fissato dalle scelte teoriche e dalle possibilità osservative. Tutto questo è mirato alla costruzione di un modello *capace di vedere* una specifica fenomenologia. Nulla ci assicura perciò che si possa realizzare una situazione *ideale* simile a quella della teoria cinetica, in cui è possibile connettere in modo rigoroso, tramite la mediazione statistica, la descrizione microscopica e quella macroscopica. In genere, le scelte e le osservabili appariranno a *domini semantici diversi* non sempre convergenti in un unico quadro coerente, anche se ovviamente compatibili. Cediamo per un attimo la parola a David Deutsch, in un brano ormai famoso:

Ma in realtà la conoscenza scientifica consiste di spiegazioni, e la struttura delle spiegazioni scientifiche non riflette la gerarchia riduzionistica. Ci sono spiegazioni a ogni livello della gerarchia. Molte sono autonome, riferendosi soltanto a concetti dello stesso livello (per esempio, «l'orso ha mangiato il miele perché era affamato»). Molte implicano deduzioni nella direzione opposta a quella ipotizzata dal riduzionismo, cioè spiegano i fatti non analizzandone le componenti più piccole e più semplici, ma considerandole invece come componenti di fatti più grandi e più complessi, riguardo alle quali si hanno nondimeno teorie esplicative. Per fare un esempio, si consideri un particolare atomo di rame sulla punta del naso della statua di Winston Churchill che si trova in Parliament Square a Londra. Vorrei cercare di spiegare perché quell'atomo di rame è lì; si trova lì perché Churchill fu primo ministro alla Camera dei Comuni, situata nelle vicinanze; perché le idee e la guida di Churchill furono importanti per la vittoria degli Alleati nella seconda guerra mondiale; perché è tradizione onorare persone del genere erigendo una statua; perché il bronzo, il materiale più comune per queste statue, contiene il rame; e così via. Si spiega quindi un'osservazione fisica di livello basso – la presenza

di un atomo di rame in una particolare posizione – mediante teorie di livello altissimo su fenomeni emergenti quali idee, governo, guerra e tradizione [Deutsch 1997].

Un concetto importante implicito in questo passo, e nei due teoremi fondamentali sull'apertura logica, ci riporta al *cuore* stesso della scienza galileiana, prima che venisse associata a programmi riduzionisti e deterministi: *la scelta delle osservabili*. Questa scelta sarà funzionale al tipo di fenomeni che si vogliono studiare, ed è importante che le osservabili siano ben definite sia teoricamente che sotto il profilo osservativo. Ma non è sempre possibile, e soprattutto non è assolutamente *necessario*, che siano tutte riconducibili a un'unica sintassi, ad esempio quella physicalista. Tutto ciò erode in profondità la tradizionale dicotomia tra scienza *hard/soft* per lasciare spazio a un arcipelago di pratiche di conoscenza in cui è centrale il concetto di sistema e la ricerca di forme di confronto con l'esperienza. La scienza non è un monolite. La psicologia è una disciplina diversa dalla fisica perché diversi sono i suoi metodi, gli oggetti di studio e i *motivi* per cui li studiamo. Ogni disciplina ha i suoi modelli e ogni modello realizza un *equilibrio omeocognitivo* tra osservatore e mondo [Licata 2012b].

Un esempio di sistema non descrivibile attraverso un singolo modello è il sistema cognitivo. Il vecchio dibattito tra modelli simbolici (come quelli utilizzati dalla vecchia e nuova IA) e subsimbolici (come le reti neurali) si risolve considerando che la prima classe di modelli funziona bene nei casi in cui il numero di vincoli è basso, c'è *trasparenza semantica* (semplificando, simbolo = oggetto/azione), e l'intero processo non è dipendente dal tempo. In altre parole i sistemi simbolici funzionano bene per modellizzare *domini semantici chiusi*, dove simbolo e significato coincidono (ormai classici sono l'esempio degli scacchi o del *blockworld* di Terry Winograd), mentre i sistemi subsimbolici danno migliori prestazioni su situazioni *vicine all'emergenza*, come l'apprendimento. D'altra parte, una rete neurale classica è un *toy model* rispetto all'attività reale dei gruppi neuronali, e se vogliamo un modello ancora più raffinato dobbiamo ancora una volta rimettere in discussione l'accoppiamento con l'ambiente e i processi informativi tra mente e ambiente, ed è allora necessario far ricorso al *dissipative quantum brain* di Vitiello, in grado di affrontare la sfida di una maggiore apertura logica [Licata 2008b; Freeman e Vitiello 2008; Vitiello 2001; 2009].

La stessa attività modellistica, come ogni aspetto dell'attività matematica, è un processo, un sistema aperto dove il sistema *osservatore* non potrà descrivere e prevedere tramite le sue scelte ogni aspetto di un sistema *osservato*, se non a prezzo di una certa approssimazione. In questo senso il modello è simile a uno zoom che permette di focalizzare ad *alta risoluzione* alcuni aspetti del sistema e la cui inevitabile controparte è una *bassa risoluzione* su altri. In tal modo l'incertezza trova la sua *via regia* all'interno della filosofia della scienza come ingrediente costitutivo dell'attività modellistica sui sistemi aperti. Scegliere di lavorare con un modello significa mettere in *high resolution* alcuni aspetti del sistema e lasciarne altri in *low resolution*. Del resto esiste ormai tutta una tradizione di ricerca sulle *generalizzazioni modellistiche del principio di complementarità* della meccanica quantistica⁹ [Pattee 1978; Vol'kenshtein 1988; Klir 2005].

5. Del rumore e della casualità. La sequenza di Kolmogorov

William James, nel celebre e raffinato saggio *The Dilemma of Determinism*, sembra anticipare le posizioni sistemiche sull'osservatore *situato*, perché partendo dall'idea «forte» del determinismo laplaciano arriva a una sottile comprensione della *casualità*:

Il caposaldo del sentire deterministico è l'avversione per l'idea di caso. [...] Sembra che l'asprezza della parola «caso» stia nell'assunto secondo il quale essa significa qualche cosa di positivo e che, qualsiasi cosa accada per caso, deve essere qualcosa di genere intrinsecamente irrazionale e assurdo. Ebbene, il caso non significa nulla del genere [...]

⁹ Lungi dall'essere una *stranezza* della meccanica quantistica, il significato del famoso principio di indeterminazione, come vedremo più avanti, non risiede nelle sue limitazioni («è impossibile misurare...»). Si tratta di una conseguenza del fatto che la matematica base della meccanica quantistica è *lineare*. Relazioni di questo tipo si trovano in ogni sistema lineare. La vera questione è *perché* si presenta nell'ordine della costante di Planck. Una brillante demistificazione della forma del principio di indeterminazione in Kosko [1995]. Va anche ricordato che la celebre spiegazione dell'indeterminazione di Heisenberg come «disturbo» è *inesatta* dal punto di vista quantistico (ci si potrebbe sempre chiedere perché non si può *calcolare* con precisione il disturbo), ma fu proprio questo stile di spiegazione che convinse Heisenberg, come il suo maestro Bohr, che la complementarità dovesse essere un principio generale dell'attività scientifica legato al rapporto osservatore e osservato.

il carattere casuale (di un evento) è che in esso vi è davvero qualche cosa di tutto suo, qualche cosa che non è la proprietà incondizionata del tutto. Il tutto, se vuole questa proprietà, deve aspettare fino a quando può ottenerla, se è una questione di caso. [...] Il caso significa soltanto il fatto negativo che nessuna parte del tutto, per quanto grande, può pretendere di controllare in modo assoluto i destini del tutto [James 1884].

Fin qui la casualità è intesa come ciò che è fuori dall'*orizzonte sistemico* e dunque mostra una stretta affinità con il concetto di emergenza, qualcosa legato alla complessità delle relazioni sistema/ambiente. Ci si potrebbe domandare perché la modificazione di un sistema viene definita a volte caso e altre emergenza. La questione è tutt'altro che banale ed è lontana dall'essere risolta. Nella sua classificazione sulle *tipologie d'emergenza*, Crutchfield fa riferimento ad una *emergenza intuitiva* legata alla *sorpresa* per eventi che non ci aspettiamo. Questo è un tema che riguarda la ricognizione dell'emergenza come *design cognitivo* [Crutchfield 1994; Minati e Licata 2010]. Su un piano più direttamente fisico possiamo affermare che stabiliamo casuale un evento quando la perturbazione di un sistema è minima o transitoria, e invece rileviamo emergenza quando identifichiamo nella modificazione di un sistema qualche forma di nuova coerenza. Le due questioni sono connesse, e in modo rilevante. Infatti è una capacità di sistemi sufficientemente strutturati quella di accogliere selettivamente il rumore ambientale e amplificarlo in modo costruttivo. Esiste ormai un'ampia letteratura sull'*order from noise*, e proprio le applicazioni di questi modelli all'attività cerebrale hanno mostrato come la dinamica stocastica neuronale giochi il ruolo di uno «stato attento» pronto a catturare dal rumore esterno un segnale, assegnargli un *significato* in relazione alla storia del sistema e permettere così l'emergenza di nuovi *pattern*¹⁰.

La domanda che sorge spontanea a questo punto è: come è possibile un evento genuinamente casuale? Il dibattito sulla causalità è molto complesso e articolato e va dall'idea di corrispondenza uno-a-uno tra posizione e velocità di una particella classica a un

¹⁰ Un classico matematico è Matsumoto e Tsuda [1983]; per le recenti applicazioni alla scienza del cervello cfr. Cheung e Vickerstaff [2012]; Fraiman e Chialvo [2012]. Un approccio cibernetico è delineato in Atlan [1986]. Ricordiamo qui l'efficace «definizione» di Bart Kosko: «Noise is a signal that you don't like» [Kosko 2006].

istante t e posizioni e velocità a ogni istante successivo, retta dalle leggi del moto di Newton, fino alle più recenti formulazioni in termini di correlazioni probabilistiche [Laudisa 2010]. In fisica, e nella scienza «praticata», la questione della causalità coincide con le correlazioni stabilite dalle «leggi» e dunque la domanda di partenza si trasforma nella seguente: come è possibile il caso in un universo retto da «leggi»? Ancora una volta la risposta (o meglio, l'aspetto *ingannatore* della domanda così formulata), risiede in una considerazione più attenta di ciò che le leggi descrivono. Come abbiamo già avuto modo di vedere, le leggi e le equazioni che le esprimono indicano classi di eventi e comportamenti, e non contengono alcuna «prescrizione» sugli eventi *singoli*! All'interno dello schema generale dei comportamenti «permessi» dalle leggi, abbiamo visto che sono poi le specifiche condizioni iniziali e al contorno che fissano le peculiarità di un singolo evento, e in generale – contrariamente a ciò che sembra indicare l'identificazione storica *tout court* della causalità con lo stretto determinismo classico –, le «possibilità» degli eventi singoli sono tutt'altro che univoche. Anzi, le regolarità in natura ci si presentano sempre *come linee di tendenza statistiche* [Bohm 1957], tanto che è stato proposto un approccio generale al metodo scientifico e alla scoperta di leggi come ciò che massimizza un'informazione globale su un grande numero di osservazioni, l'informazione di Fisher, dopo aver «fatto la tara» agli eventi spuri e le deviazioni più grandi [Frieden 2004; ma anche Zbilut e Giuliani 2009]. Anche se è difficile condividere questo tipo di visione¹¹, il punto essenziale qui è comprendere che l'universo degli eventi non univocamente definito dalle leggi è naturalmente ampio e variegato, e che dunque la *causalità delle leggi* porta con sé – in maniera diversa, a seconda del *range* studiato – una sua

¹¹ Non è possibile «dedurre» le leggi soltanto come tendenze statistiche direttamente dai dati sperimentali senza un gran numero di assunzioni *ad hoc* che siamo in grado di fare soltanto grazie alle conoscenze pregresse e alle teorie che ci guidano. Difficile immaginare le equazioni di Maxwell emergere dal magma dei dati statistici! Al contrario, sono il risultato di una geniale sintesi dello scienziato scozzese su un secolo di esperimenti di elettricità e magnetismo, basata sul concetto di campo di Faraday e resa possibile dall'introduzione di un'ipotesi di simmetria matematica da cui poi sarebbero scaturite le onde elettromagnetiche. Dalla semplice registrazione di dati alle leggi c'è un *salto concettuale* di tipo abduttivo, come sosteneva C.S. Peirce. O più efficacemente, in accordo con A. Einstein, i dati *sottodeterminano* le teorie [Colage 2010].

complementare casualità. Pertanto, come scrive Bohm, la necessità e la possibilità si rivelano categorie *più ampie* della causalità, e la *fluttuazione*, intesa come scostamento non solo dai valori medi ma anche dai comportamenti «legiferati», uno dei più efficaci «meccanismi» costruttivi per miscelare ordine ed entropia¹².

Un esempio di casualità ricco di interessanti implicazioni concettuali è il già citato *moto browniano*, primo passo della moderna teoria stocastica. Il problema del moto disordinato a zig-zag di particelle in sospensione fluida all'equilibrio è un caso in cui le leggi «fondamentali» del moto non sono di alcuna utilità, perché la descrizione del comportamento particellare richiede un'analisi degli urti tra la particella e i costituenti del *medium* in cui è immersa, e diventa perciò necessario introdurre una descrizione globale dei comportamenti diffusivi. Il moto browniano ha fornito lo spunto per lo studio dei processi stocastici, oggi ampiamente utilizzati dalla fisica alla biologia, dalla sociologia alla finanza, e ha suggerito un approccio generale alla casualità come *causalità nascosta*, che si è poi tentato di trasportare alla fisica quantistica per tentare di spiegarne le caratteristiche distribuzioni di probabilità. In effetti, c'è una forte parentela tra l'equazione di Schrödinger e quella di Fokker-Planck, e le fluttuazioni del vuoto quantistico sono ormai ben note sin dall'effetto Casimir per arrivare oggi alle indagini sperimentali sulla radiazione di Fulling-Davies-Unruh e sui domini di coerenza in teoria quantistica dei campi. Anche qui, però, il successo della spiegazione dipende dallo scopo per cui abbiamo costruito il modello. Infatti l'interpretazione stocastica della meccanica quantistica fornisce un'ottima lettura della fenomenologia e una buona descrizione semi-classica del vuoto quantistico ma, come vedremo, sarà necessario introdurre ipotesi più radicali per avere una comprensione dei fenomeni di non-località e delle correlazioni EPR-Bell [Mlodinow 2009; Nelson 2001; De La Pena e Cetto 2010; Dürr *et al.* 1992].

Negli anni '60 il grande matematico Andrej Kolmogorov mise a punto una definizione di casualità come «purezza» di una distribuzione gaussiana di dati reali. Il suo lavoro, oggi noto come *criterio di Kolmogorov-Smirnov*, può essere riassunto dicendo che

¹² L'etimologia del termine «caso» ci mostra che esso non è mai stato opposto alla causalità. Sia il *casus* latino che l'inglese *randomness* che sembra derivare dal francese arcaico *randon*, indicano tutti eventi singoli che semplicemente accadono compatibilmente con il quadro di possibilità definito dalle leggi.

una sequenza di numeri è casuale se la regola per generarla è lunga quanto la sequenza stessa [Gleick 2012]. Questo risultato sorprendente riassume molte delle cose che abbiamo già detto a proposito della casualità fisica. Pensiamo infatti ad una sequenza di numeri come valori correlati ad eventi che accadono; se la sequenza non può essere «zippata» in una sequenza più piccola, che rappresenterebbe dunque la «legge generatrice», vuol dire che l'unico modo che ho per sapere quale sarà il prossimo valore è l'osservazione, non potendolo dedurre da una regola «causale». Naturalmente è sempre possibile pensare, in linea teorica, che dati tempo e risorse sufficienti sarà sempre possibile trovare una legge generatrice. Questo risolve l'apparente paradosso in cui ci imbattiamo studiando la sequenza tramite l'informazione di Shannon-Turing. Ogni numero è una nuova sequenza di bit di informazione, più lunga è la sequenza più informazione contiene, eppure noi tendiamo a trovare noiose le sequenze casuali. Infatti, come abbiamo più volte ricordato, i processi cognitivi gestiscono informazione semantica, e riconoscono le configurazioni «interessanti» prima di costruirci sopra una sintassi, mentre la misura di Shannon-Turing riguarda soltanto gli aspetti sintattici dell'informazione. Estrapolando speculativamente questa linea di pensiero un sostenitore “estremo” della concezione delle leggi fisiche come linee di tendenza statistiche potrebbe arrivare a sostenere che siamo immersi in una enorme sequenza *random* e costruiamo noi le correlazioni significative. Potremmo smentirlo usando i suoi stessi strumenti e dicendo che è estremamente improbabile che intere classi di correlazioni «assecondino» così bene i nostri sforzi, cosa su cui alla fine risiede il valore conoscitivo della scienza: c'è qualcosa che fa *resistenza ai nostri modelli*, e noi riconosciamo in questa resistenza qualcosa di altamente significativo.

6. *Nei luoghi incerti: modelli non-ideali e scommesse razionali*

Abbiamo visto che i territori dell'incertezza non riguardano soltanto i casi in cui l'alto numero di oggetti rende praticamente impossibile un'osservazione diretta delle proprietà individuali e un approccio computazionale, ma confinano con quelli dell'emergenza. Ci sono casi, come quello esaminato dei gas perfetti, dove è possibile costruire un modello macroscopico in grado di «far vedere» oltre l'orizzonte particellare. Perché questo è possibi-

le? Nel caso del gas alcune ipotesi permettono l'applicazione immediata delle leggi di conservazione, ad esempio l'identità «fissa» di particelle e forze, il carattere puramente «passivo» dell'ambiente, la caratteristica a-storicità dei comportamenti, che possono essere «catturati» su entrambe le scale – micro e macro – da un approccio dinamico che sfrutta tutte le risorse della fisica. Il successo di modelli come il *Quantum Brain* ha stimolato la ricerca in direzione di un *ampliamento della sintassi* della teoria quantistica dei campi (QFT) come *framework* generale per descrivere l'emergenza [Licata 2010; Sewell 2002; Pessa 2006; 2009; Licata 2011b]. L'idea centrale è che l'emergenza di caratteristiche non riconducibili direttamente ai costituenti elementari può essere descritta come una *transizione di fase con rottura di simmetria* in cui un altissimo numero di microstati elementari può correlarsi in modo da dare luogo a strutture organizzative complesse. Nonostante il dibattito sia ancora aperto, ci sembra di poter dire che per quanto opportunamente *esteso* il linguaggio della QFT appare ancora *troppo povero* per le esigenze dei sistemi biologici o cognitivi, *fortemente storici*, e per una *teoria generale del cambiamento*, che implicherebbe in definitiva la capacità di descrivere il cambiamento e l'emergenza eliminando ogni distinzione artificiosa tra sistema/ambiente, e rinunciando dunque come «guida» ai principi di conservazione e relative simmetrie che costituiscono da secoli l'armamentario concettuale della fisica teorica. Dobbiamo dunque rinunciare a descrivere la complessità del mondo? Questa domanda, più che rappresentare l'esito ultimo di uno scacco definitivo ai cosiddetti *modelli ideali*, rimette in discussione l'idea stessa di «teoria» e di «descrizione». Con questi termini indichiamo in genere la possibilità di descrivere l'evoluzione di sistemi costruendo equazioni in grado di fornirci almeno delle indicazioni sulle classi di comportamenti possibili utilizzando le caratteristiche *invarianti* del sistema. I limiti degli approcci ideali sembrano dirci però che queste caratteristiche non ci portano lontano nella stragrande varietà dei cambiamenti che effettivamente osserviamo. Sarebbe necessaria *una matematica in grado di seguire il sistema di partenza e complessificarsi con esso*¹³.

¹³ L'inevitabilità di una *complessificazione imprevedibile* costituisce la principale riserva di Kurt Gödel nei confronti dell'IA, che riflette chiaramente la sua concezione della matematica e la funzione critica dei teoremi limitativi e di indecidibilità nei confronti del programma hilbertiano [Licata 2008a].

È questo il modo ottimale (e, ammettiamolo, ottimista!) di introdurre l'altra grande classe di approcci ai sistemi complessi, i *modelli non-ideali*. È una classe molto vasta e variegata il cui tratto comune è l'intento non di scrivere equazioni «buone per tutte le stagioni», ma progettare *simulazioni* in grado di «seguire» il processo. Naturalmente, anche in questo caso si fanno assunzioni sull'ambiente e sono cruciali le scelte dell'osservatore-progettista, ma si va in direzione quasi opposta a quella dei modelli ideali: si lascia la maggiore *plasticità* possibile alle dinamiche relazionali tra «oggetti» e ci si concentra direttamente sui vincoli che possono promettere una evoluzione *non banale*, realizzando così una sorta di *laboratorio virtuale*.

Si tratta di modelli basati essenzialmente sulla Turing computazione, ben lontani dunque dal mondo quantistico, che traggono però proprio da questa caratteristica gran parte della loro forza. Quando avviene un cambiamento, soprattutto del tipo non descrivibile con i modelli ideali, sia gli aspetti individuali che collettivi si «rimodellano» grazie all'emergenza mesoscopica di *variabili configurazionali* che traghettano il processo «mediando» tra il livello microscopico e macroscopico in modo imprevedibile, ma che ben si presta ad essere studiato tramite informazione di Shannon-Turing. Un cenno a parte merita l'*approccio meta-strutturale*, che cerca su sequenze di dati storici («fotografie» del processo in esame), indizi di emergenza e coerenza interrogando il cambiamento attraverso la costruzione di più *vettori mesoscopici* di osservabili mirate a cogliere aspetti diversi del processo in esame. In questo modo è possibile individuare ed estrarre informazioni sul cambiamento, sulle sue fasi, sequenze e modalità; ad esempio quali elementi giocano lo stesso ruolo in istanti diversi, o ruoli diversi nello stesso istante. L'insieme dei vettori mesoscopici costituisce dunque una «griglia» topologica attiva che *sonda* il sistema attraverso procedure computazionali alla ricerca di tracce di emergenza e di modificazioni strutturali. I processi di cambiamento sono caratterizzati in tal modo come «coerenza», intesa sotto due punti di vista complementari: *a) cognitivamente*, come capacità dell'osservatore di individuare «unità» e «identità» nel cambiamento attraverso un'opportuna scelta delle osservabili; *b) ergodicamente* o *quasi-ergodicamente*, in relazione alla distribuzione statistica dell'energia nel sistema. In questo senso le meta-strutture sono non soltanto uno strumento utile per indagare il cambiamento con procedure

computazionali, ma esplicitano al contempo le scelte cognitive del sistema osservante [Steeb 2008; Wolfram 2002; Parisi 2001; Minati e Pessa 2006; Minati 2008; Minati e Licata 2012]. Se, da una parte, l'aspirazione all'unità motiva ancora possibili sintesi tra modelli ideali e non ideali, sembra chiaro che in questi ultimi si delinea un nuovo *stile* di spiegazione scientifica, tendente non alla predicibilità quanto piuttosto a una *comprensione* rivolta all'*intervento* sul processo [Licata 2009].

Terreno d'applicazione tradizionale dei modelli non-ideali sono molti sistemi disordinati di reti, sia in campo biologico che socioeconomico. La *trasportabilità modellistica* ha permesso la migrazione di modelli fisici anche in campo sociale, a volte mescolati con approcci euristici e con ingredienti della teoria dinamica dei giochi e delle decisioni. Quest'ultima, nel frattempo, è diventata sempre meno astrattamente «razionale», e sempre più *embodied*, in una crescente complessificazione dell'agente e delle sue motivazioni. Si può dire che si è passati, per usare una felice espressione di Mario Graziano, «dai giochi ai giocatori» [Siegfried 2010; Galam 2012; Graziano 2012; Licata 2012c].

La teoria della probabilità è stata considerata per molto tempo uno strumento ideale per modellare situazioni di incertezza, passando dai sistemi fisici a quelli socioeconomici grazie ai buoni uffici, tra gli altri, di P.S. Laplace e J.C. Maxwell, che in più di un'occasione la definirono come l'espressione matematica del «buon senso» e come tale la base delle scelte dell'«uomo ragionevole». L'interrogazione dei dati statistici, le molte coniugazioni della teoria della probabilità, e il forte dibattito interno che da queste scaturisce sono un campo altamente specializzato sul quale non possiamo qui soffermarci (per un quadro generale si veda Vámos [1993]). Ci limiteremo a sottolineare che un sistema altamente complesso, con processi di forte emergenza, *non è suscettibile di alcuna gerarchizzazione, neppure di tipo probabilistico*. Questo avviene perché il sistema può esprimere molti comportamenti equivalenti dal punto di vista energetico, ma *non indifferenti* rispetto alla *storia*, ossia al cammino fatto per arrivare a quella specifica configurazione, che in effetti è in gran parte fissata dal gioco stratificato delle condizioni al contorno. Ancora una volta ci troviamo davanti all'irriducibile importanza storica del *qui e ora*.

Se nelle scienze fisiche, e in larga misura in quelle biologiche, lo scenario teorico e il tipo di corrispondenza con i dati osservativi

delimitano lo spazio delle possibilità in modo da poter riconoscere più facilmente l'emergenza, nelle scienze sociali questo non è possibile. In un suo recente libro, Barabasi [2011] sostiene che la disponibilità di dati in tempo reale, tipica dell'epoca dell'*high frequency trading*, permette oggi non soltanto di fare previsioni di tendenza, ma anche di orientarle. Questo implica però una *conoscenza empirica* profonda della rete che si studia e del suo «carattere». Possiamo dunque affermare che man mano che ci si allontana dai sistemi a bassa apertura logica e si considerano sistemi che producono emergenza in modo sempre più radicale, *cambia il senso stesso della probabilità* (la sua «ontologia»), che si sposta da una concezione «oggettivista» all'accezione soggettivista della «scommessa» di B. de Finetti come *rappresentazione dello stato delle conoscenze dell'agente* che, come tale, è sempre «situato» [de Finetti 2005; 1995; De Felice *et al.* 2010]. Bisogna distinguere allora tra *probabilità teorica*, che indica i criteri generali per lo studio delle situazioni di incertezza, e *calcolo delle probabilità*, in cui questi criteri incontrano il caso specifico. Non soltanto *ogni probabilità è condizionata*, ma lo è in modo diverso per osservatori diversi. È questo il punto in cui il pensiero di de Finetti stabilisce un'importante connessione tra matematica e cognizione in una teoria generale dell'incertezza¹⁴. La *scommessa*, infatti, prima di essere un calcolo è una *scelta cognitiva* che mette in gioco le risorse dell'agente e i suoi *scopi*. Una macchina, anche dotata dei più raffinati algoritmi di *updating bayesiano*, nelle stesse condizioni calcolerà gli stessi stati, un sistema cognitivo complesso no, perché non cambieranno soltanto le sue evidenze ma, con la sua storia, le sue motivazioni. In altre parole, per quest'ultimo non esistono «le stesse condizioni».

L'*estremistan*, la terra dei cigni neri di Nassim N. Taleb [2009] dove si verificano eventi con probabilità piccolissima e fortissimo impatto, sembra dunque non colonizzabile in modo standard «per tutti», ma si offre diversamente a ogni esploratore. A dispetto di questa irriducibile indomabilità pratica, esistono diverse linee teoriche interessanti per formalizzare eventi di

¹⁴ È interessante notare l'analogia tra il *test di Turing* sulla definizione operativa di intelligenza e il *gioco di de Finetti*, per associare un valore numerico ad una valutazione soggettiva o credenza. In entrambi i casi lo schema generale è quello della teoria dei giochi e in entrambi i casi l'intento è quello di rendere accessibili al ragionamento scientifico concetti altrimenti vaghi.

piccolissima probabilità [Magari 1986; Hammond 1999; Hosni e Montagna 2010]. La scommessa può essere dunque «razionale», ma questa nuova accezione estesa cambia il senso della decisione, che non è più solo ottimizzazione di un *fitness*, ma intervento attivo sul paesaggio!

Altro tema portante e ricco di suggestioni nel saggio di Taleb è la polemica nei confronti di quella che chiama «ideologia della curva a campana». Nella maggior parte delle distribuzioni di eventi dai quali ci aspettiamo una distribuzione gaussiana osserviamo invece degli scostamenti significativi, ed assai simili tra loro, in particolare nei sistemi biologici ed economici. Perché? Uno dei motivi può essere ricercato, ad esempio, nelle *reti di piccolo mondo* (*small world nets*) [Buchanan 2004; Dorogotsev e Mendes 2003]. Quando un evento *accade* non è mai nell'oceano senza memoria della casualità pura, ma si iscrive in reti sincroniche e diacroniche di eventi che molto spesso sono proprio quelli interconnessi da grossi *hub* significativi che hanno acquisito una meta stabilità di lungo periodo. In questo senso possiamo dire che se nei sistemi complessi «ogni possibilità è eccessivamente improbabile a priori» [Keynes 2010], la grande varietà del mondo che ci circonda si realizza grazie al *potere aggregante* del caso e della causalità.

7. *Interludio quantistico: casualità intrinseca?*

È opinione diffusa che la fisica quantistica contenga elementi di «casualità intrinseca», in qualche modo inafferrabile e irriducibile a ogni altro tipo di casualità che è possibile incontrare nell'ambito della fisica classica. Abbiamo visto che la casualità non è in contrasto con la nozione di causalità, ed è anzi il suo naturale complemento, nella misura in cui una legge descrive una classe di eventi mentre la casualità è sempre relativa ad un evento singolo, un'uscita nella sequenza di Kolmogorov. Se il *dado quantistico* fornisce sequenze *random* in grado di superare i migliori test di casualità [Pironio *et al.* 2010], questo avviene per qualche ingrediente peculiare della fisica quantistica che consente una relazione del tutto sconosciuta al mondo classico tra leggi ed eventi. È ben noto il lungo dibattito sul significato della funzione d'onda intorno all'interpretazione di Copenaghen e l'annosa questione del realismo, che ha paradossalmente ral-

lentato la consapevolezza del vero elemento distintivo del regno quantistico, ossia la presenza di *effetti non-locali*¹⁵ [Licata 2009; Bell 2010].

Con la progressiva erosione del ruolo dominante dell'interpretazione di Bohr e altri, si sta lentamente affermando un nuovo stile di pensiero pronto a rivedere criticamente il ruolo della funzione d'onda¹⁶ e accogliere la non-località come elemento primario e fondante della costruzione della teoria, proprio come Einstein pose il principio d'equivalenza, *strana curiosità* della fisica newtoniana, come chiave di volta della nuova teoria metrica della gravitazione. Faremo qui menzione di tre linee di ricerca che ci sembrano promettenti e in larga misura convergenti. L'ultimo Bohm, ormai lontano dalle variabili nascoste, dall'approccio stocastico e da ogni idea di *recupero classico* della fisica quantistica, si rivolge con B. Hiley allo studio delle strutture algebrico-topologiche che *informano* il tessuto sotterraneo dello spazio-tempo (*implicate order*) e si manifestano con l'azione del *potenziale quantico* [Bohm 2002; Bohm e Hiley 1993; Hiley 2011]. Altro approccio consiste nel guardare la meccanica quantistica (QM) alla luce del suo più potente frutto maturo, quella *teoria quantistica dei campi* (QFT) che abbiamo già visto essere la sintassi più generale per la costruzione di teorie fisiche. In questa lettura dei fenomeni quantistici *né onde né particelle* hanno cittadinanza, ma esistono soltanto *modi del campo quantizzato* «intrecciati» tra loro. Scompaiono così molti dei celebri *paradossi* che hanno fatto versare fiumi d'inchiostro: cosa c'è infatti di più naturale della sovrapposizione per un campo? Quanto al famoso *collasso* della funzione d'onda, anche qui appare del tutto naturale pensare che un modo del campo venga registrato da un rivelatore localizzato secondo la «vecchia» legge di Planck! In questo approccio, che si presenta come l'unico *realistico*

¹⁵ Spesso detti EPR-Bell, dall'acronimo di Einstein e dei suoi collaboratori B. Podolski e N. Rosen, con i quali aveva firmato il famoso articolo sull'incompletezza della meccanica quantistica e sulle «spettrali azioni a distanza» che saranno poi riconosciute, grazie al lavoro di D. Bohm e di J. Bell, come l'elemento rivoluzionario della fisica quantistica!

¹⁶ Scriveva il compianto Marcello Cini (1923-2012): «So bene che indietro non si torna, e che i fisici continueranno a considerare l'equazione di Schrödinger un pilastro fondamentale della loro disciplina, ma a me basta aver finalmente capito, dopo averla insegnata per cinquant'anni, che le funzioni d'onda possono raggiungere l'etere nel magazzino dei robivecchi», comunicazione personale all'autore, 2002.

possibile, la funzione d'onda è *il ricoprimento statistico del gran numero di modi di un campo quantizzato*. Nella QFT la vecchia forma del principio di indeterminazione in posizione e velocità (che esprimeva il limite del linguaggio classico), viene sostituita dalla più immediata $\Delta n \Delta \varphi \geq \hbar$, dove \hbar è la costante di Planck, n il numero di quanti e φ la fase dei modi. Quando il numero n dei quanti considerati «individualmente» è ben definito e sono scorrelati in fase tra loro si adotta un linguaggio «particellare», quando invece sono correlati è vantaggioso il linguaggio ondulatorio. È possibile in questo modo recuperare molte intuizioni della storia del dibattito interpretativo in una forma logica nuova e unitaria: le *famose variabili* nascoste sono proprio i modi del campo associati a un fotone o elettrone, e il teorema di Bell diventa una *conciliazione* tra Einstein e Bohr. Infatti, è vero che la QM è *incompleta*, ma non perché bisogna rinunciare ad una *descrizione oggettiva* della realtà fisica, ma semplicemente perché *gli eventi quantistici non sono localizzabili* nello spazio-tempo e dunque *la realtà quantistica è fondamentalmente non-locale*. Ogni evento fisico può essere correlato agli altri (*entangled*) mediante il vuoto della QFT [Del Giudice 2010; Preparata 2002; 2001; Cini 2003]. Anche il recente esperimento di S. Afshar trova una sua naturale spiegazione non come cavallo di troia per aggirare l'indeterminazione di Heisenberg, come erroneamente si è detto, ma soltanto la sua forma *naive*: non è possibile misurare posizione e velocità di una particella semplicemente perché sono concetti classici, ma è possibile realizzare misure sperimentali precise e complementari all'interno delle relazioni di coerenza della QFT su localizzazione e impulso di un modo del campo [Afshar *et al.* 2007].

Il problema però è ancora ben lontano dall'essere risolto. Continua infatti ad essere più facile parlare di *entanglement* utilizzando il vecchio linguaggio ondulatorio della funzione d'onda. Nonostante le sue potenzialità concettuali la sintassi della QFT è infatti ancora largamente locale perché si è sviluppata sotto l'impulso della fisica delle particelle. Sarebbe necessario fondere le strutture matematiche per la non-località di Bohm e Hiley in QM con il potere esplicativo e direttamente fisico della QFT. Un tentativo in questo senso è la *nuova teoria transazionale* che si è sviluppata dal lavoro iniziale di Cramer [1986], ed è stata ripresa da Kastner [2012], Chiatti [2011] e Licata [2013]. In questa teoria lo spazio tempo della fisica classica, della QM

«tradizionale» e della QFT con l'enorme ricchezza delle sue manifestazioni emerge da una *rete di transazioni non-locali*, che viene ad essere così la *struttura portante* del mondo fisico. Non si tratta di eventi esotici, anzi le transazioni si trovano già all'origine della teoria dei quanti, come i famosi *salto quantici* dell'atomo di Bohr. La teoria ha implicazioni innovative e stringenti sia per la gravità quantistica che per la cosmologia, ed accoglie senza problemi sia la QM che la QFT armonizzandole in una struttura unitaria. In particolare è possibile dedurre tutto l'armamentario tradizionale: equazione di Schrödinger, fluttuazioni, integrali di cammino e diagrammi di Feynman. L'elemento di novità, e il prezzo da pagare, è l'introduzione di un *elemento atemporale* nella descrizione del mondo fisico. La rete transazionale costituisce infatti la *trama logica del mondo fisico*, e dinamica e località, come lo stesso spazio-tempo in cui sono definite, diventano caratteristiche *emergenti*. Ci sono molte metafore, più o meno matematiche, per indicare i due livelli complementari di descrizione del mondo fisico; da una parte, utilizzando la terminologia bohmiana, l'*implicate order* della rete transazionale, caratterizzato dalla *causalità formale*, dall'altro l'*explicate order* dello spazio-tempo, in cui vige la *causalità dinamica* delle leggi fisiche. Qui utilizzeremo l'immagine del frattale di Mandelbrot, dove la modificazione in un singolo punto modifica «istantaneamente» l'intera struttura. I fenomeni non-locali agiscono nello stesso modo, come se fossero correlati «oltre» lo spazio-tempo. La causalità formale della rete transazionale è simile a quella che si realizza nel frattale di Mandelbrot (o in un programma per computer che lo calcola), ma l'osservatore quantistico, potendo rilevare soltanto causalità dinamica nello spazio-tempo, deve ricorrere a *misure contestuali* (scelta delle osservabili), e rivelerà «misteriose» correlazioni non-locali tra *qui* e *là*, fluttuazioni ed eventi casuali, che sono in ultima analisi tracce emergenti della rete transazionale non-locale. Si arriva così ad una conclusione per molti versi sorprendente: lungi dall'essere il regno dell'incertezza e della casualità intrinseca, la fisica quantistica deve le sue caratteristiche ad una rete informazionale di transazioni perfettamente definite nell'*implicate order* (che Bohm definiva *informazione attiva*), a cui noi, semplicemente, non abbiamo accesso diretto, e dunque abbiamo costruito la QM come una teoria dell'*informazione contestuale*, dove la casualità è il frutto di una *causalità inaccessibile* [Licata 2008c].

8. Conclusione: l'incertezza, la conoscenza e il mondo aperto

C'è una bella frase attribuita a Stefan Banach (citata in Ulam [1995]) che recita più o meno così: «i buoni matematici riescono a vedere analogie. I grandi matematici riescono a vedere analogie tra analogie». La matematica nel suo farsi è qualcosa di diverso ed estremamente *tecnico*, ma in effetti la disposizione a cogliere e modellare strutture è un requisito fondamentale del matematico. Lo scienziato con una forte *vocazione sistemica*, indipendentemente dal suo campo d'elezione, sviluppa una sensibilità critica verso il metodo che lo mette in grado di attivare nuove strategie cognitive. È questo tipo di *sensibilità epistemologica* ad individuare nella fisica quantistica una *teoria generale dell'informazione contestuale* che si presta a potenti generalizzazioni sistemiche in grado di modificare il tradizionale approccio all'incertezza. L'abbandono definitivo della scienza del demone di Laplace non ci lascia più poveri, ma rivela una serie preziosa di correlazioni concettuali dove prima c'erano soltanto dicotomie. L'incertezza non è semplicemente una limitazione pratica nella conquista della certezza, ma il complemento naturale di quell'attività di *design cognitivo* su sistemi e modelli che è il momento costitutivo e fondante di ogni scienza. Un modello realizza un equilibrio omeocognitivo metastabile tra osservatore e sistema, una *prospettiva di conoscenza* che mette in alta risoluzione alcuni aspetti e ne lascia altri in ombra. La scelta di *osservabili, scopi e risoluzione* genera allo stesso tempo *informazione significativa ed incertezza*. Lavorare con sistemi semplici ci ha fatto credere che ogni prospettiva potesse essere esplorata in modo da realizzare una torre di conoscenze perfettamente definite in ogni livello e convergenti, ma l'esperienza della complessità ci ha fatto comprendere che la sintassi e il metodo della teoria cinetica o delle *effective quantum field theories* sono casi esemplari non suscettibili di ulteriori estensioni. L'apertura logica mostra che la conoscenza scientifica del mondo non si estende in una singola dimensione verticale come un grattacielo, non si complica come un unico algoritmo, ma si configura piuttosto come l'ampliamento di un *arcipelago di domini cognitivi* attraversato da *incertezza sistemica*. Abbiamo visto come parte di questa incertezza sia legata alle contingenze, quell'accadere casuale, qui e ora, che è componente decisiva nello studio dei sistemi storici e che non può essere prevista dalle catene causali di alcuna «legge fondamentale». Casualità e rumore sono complementari alla griglia causale del mondo e costituiscono

risorse sintattiche indispensabili per innescare processi d'emergenza semantica, nel duplice senso di strutture che cambiano *nel mondo* e che riconosciamo *nella nostra mente*. Alle alte complessità dei sistemi cognitivi e sociali il paesaggio si fa più incerto, dobbiamo abbandonare gran parte del bagaglio dei modelli ideali della fisica ed inventarci nuovi strumenti. Ancora una volta, un'apparente limite si traduce in possibilità, non si tratta più di «predire» eventi o comportamenti, ma di simulare sistemi, gestire complessità e definire nuovi territori d'intervento con le nostre scommesse razionali. Un mondo senza incertezza è un mondo chiuso dove la conoscenza è non soltanto finita, priva di senso autentico, si identificherebbe con l'esperienza e la gestione euristica, puramente «economica», di un'enorme complicazione. L'incertezza, alla fine, si rivela come la *frontiera mobile della conoscenza*.

Riferimenti bibliografici

- Afshar, S.S., Flores, E., Mc Donald, K.F. e Knoesel, E.
2007 *Paradox in Wave-particle Duality*, in «Foundation of Physics», 37, 2, pp. 295-305.
- Anderson, P.W.
1972 *More is Different*, in «Science», 177, 4047, pp. 393-396.
2011 *More and Different: Notes from a Thoughtful Curmudgeon*, Singapore, World Scientific.
- Arecchi, F.T.
2008 *Coerenza. Complessità. Creatività*, Roma, Di Renzo Editore.
- Atlan, H.
1986 *Tra il cristallo e il fumo. Saggio sull'organizzazione del vivente*, Firenze, Hopefulmonster.
- Auyang, S.
1999 *Foundations of Complex-system Theories: In Economics, Evolutionary Biology, and Statistical Physics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Barabasi, A.L.
2011 *Lampi. La trama nascosta che guida la nostra vita*, Torino, Einaudi.
- Bell, J.
1987 *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press; trad. it. a cura di G. Lorenzin, *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*, Milano, Adelphi, 2010.
- 2010 *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*, Milano, Adelphi.

- Bohm, D.
 1957 *Causality and Chance in Modern Physics*, London, Routledge;
 trad. it. a cura di B. Osimo, *Causalità e caso nella fisica moderna*, Napoli, Cuen, Città della Scienza, 1997.
- 2002 *Wholeness and the Implicate Order*, London, Routledge.
- Bohm, D. e Hiley, B.
 1993 *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*, London, Routledge.
- Buchanan, M.
 2003 *Nexus. Perché la natura, la società, l'economia, la comunicazione funzionano allo stesso modo*, Milano, Mondadori.
- Caianello, E.R.
 1992 *Quantum and Other Physics as Systems Theory*, in «La Rivista del Nuovo Cimento», 15, 4.
- Calvino, I.
 2000 *Lezioni americane*, Milano, Mondadori.
- Cariani, P.
 2009 *The Homeostat as Embodiment of Adaptive Control*, in «International Journal of General System», 38, 2.
- Castellani, E.
 2002 *Reductionism, Emergence, and Effective Field Theories*, in «Studies in History and Philosophy of Modern Physics», 33, 2, pp. 251-267.
- Ceruti, M.
 2009 *Il vincolo e la possibilità*, Milano, Raffaello Cortina.
- Chaitin, G.
 2007 *Alla ricerca di Omega*, Milano, Adelphi.
- Cheung, A. e Vickerstaff, R.
 2010 *Finding the Way with a Noisy Brain*, in «PLoS Computational Biology», 6, 11.
- Chiatti, L.
 2011 *Choosing the Right Relativity for QFT*, in *Vision of Oneness*, a cura di I. Licata e A. Sakaji, Roma, Aracne.
- Cini, M.
 2003 *Field Quantization and Wave Particle Duality*, in «Annals of Physics», 305, pp. 83-95.
- Colage, I.
 2010 *Interazione e interferenza. Epistemologia scientifica ispirata al pensiero di Charles S. Peirce*, Roma, Pontificia Università Gregoriana.
- Coniglione, F.
 2011 *Realtà e astrazione. Scuola polacca ed epistemologia post-positivistica*, Roma, Bonanno Editore.

- Cramer, J.
1986 *The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics*, in «Revue of Modern Physics», 58, pp. 647-688.
- Crutchfield, J.P.
1994 *The Calculi of Emergence: Computation, Dynamics and Induction*, in «Physica D», 75, pp. 11-54.
- De Felice, M., Giorello, G., Moriconi, F., Piccinato, L. e Salinetti, G.
2010 *Conoscere de Finetti. Per il governo dell'incertezza*, Milano, Mondadori.
- de Finetti, B.
1995 *Filosofia della probabilità*, Milano, il Saggiatore.
2005 *Teoria delle probabilità. Sintesi introduttiva con appendice critica*, Milano, Giuffrè.
- De La Pena, L. e Cetto, A.M.
2010 *The Quantum Dice: An Introduction to Stochastic Electrodynamics*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Del Giudice, E.
2010 *Una via quantistica alla teoria dei sistemi*, in *Strutture di mondo. Il pensiero sistemico come specchio di una realtà complessa*, a cura di L. Urbani Ulivi, Bologna, Il Mulino.
- Deutsch, D.
1997 *La trama della realtà*, Torino, Einaudi.
- Dorogotsev, S.N. e Mendes, J.F.F.
2003 *Evolution of Networks: From Biological Nets to the Internet and WWW*, Oxford, Oxford Univesirty Press.
- Dürr, D., Goldstein, S. e Zanghi, N.
1992 *Quantum Equilibrium and the Origin of the Absolute Uncertainty*, in «Journal of Statistical Physics», 67, pp. 843-907.
- Fraiman, D. e Chialvo, D.
2012 *What Kind of Noise is Brain Noise: Anomalous Scaling Behavior of the Resting Brain Activity Fluctuation*, in «Frontiers in Physiology», 3.
- Freeman, W.J. e Vitiello, G.
2008 *The Dissipative Quantum Model of Brain and Laboratory Observations*, in *Physics of Emergence and Organization*, a cura di I. Licata e A. Sakaji, Singapore, World Scientific, pp. 253-252.
- Frieden, R.
2004 *Science from Fisher Information: A Unification*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Frova, A. e Marenzana, M.
2011 *Thus Spoke Galileo: The Great Scientist's Ideas and Their Relevance to the Present Day*, Oxford, Oxford University Press.

- Galam, S.
2012 *Sociophysics: A Physicist's Modeling of Psycho-political Phenomena*, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer.
- Giuliani, A.
2011 *Scienza. Istruzioni per l'uso*, Soveria Mannelli, Rubettino.
- Gleick, J.
2012 *L'informazione. Una storia. Una teoria. Un diluvio*, Milano, Feltrinelli.
- Goldstein, J.
1999 *Emergence as a Construct: History and Issues*, in «Emergence», 1, pp. 49-72.
- Graziano, M.
2012 *Epistemology of Decision: Rational Choice, Neuroscience and Biological Approaches*, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer.
- Haken, H.
2005 *Nel senso della sinergetica*, Roma, Di Renzo.
- Hammond, P.
1999 *Non-Archimedean Subjective Probabilities in Decision Theory and Games*, in «Mathematical Social Sciences», 38, 2, pp. 139-156.
- Hartmann, S.
2001 *Effective Field Theories, Reductionism and Scientific Explanation*, in «Studies in History and Philosophy of Modern Physics», 32, 2, pp. 267-304.
- Hiley, B.
2011 *Process, Distinction, Groupoids and Clifford Algebras: an Alternative View of the Quantum Formalism*, in *New Structures for Physics*, a cura di B. Coecke, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer, pp. 705-752.
- Hosni, H. e Montagna, F.
2010 *Probability, Uncertainty and Rationality*, Pisa, Pubblicazioni Scuola Normale Superiore di Pisa.
- James, W.
1884 *The Dilemma of Determinism*, in «The Unitarian Review», 22, September, pp. 193-224.
- Kastner, R.
2012 *The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics: The Reality of Possibility*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Keynes, J.M.
2010 *A Treatise on Probability: The Connection Between Philosophy and the History of Science*, Rockville, MD, Wildside Press.
- Klir, J.G.
2005 *Uncertainty and Information: Foundations of Generalized Information Theory*, Hoboken, NJ, Wiley-IEEE Press.

- Kosko, B.
 1995 *Il fuzzy-pensiero*, Milano, Baldini & Castoldi.
 2006 *Noise*, New York, Viking Press.
- Laudisa, F.
 2010 *La causalità*, Roma, Carocci.
- Laughlin, R.B. e Pines, D.
 2000 *The Theory of Everything*, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», 97, 1, pp. 28-31.
- Laughlin, R.B., Pines, D., Schmalian, J., Stojković, B.P. e Wolynes, P.
 2000 *The Middle Way*, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», 97, 1, pp. 32-37.
- Licata, I. e Minati, G.
 2010 *Creativity as Cognitive Design. The Case of Mesoscopic Variables in Meta-Structures*, in *Creativity: Fostering, Measuring and Contexts*, a cura di A.M. Corrigan, New York, Nova Publishers, pp. 95-107.
- Licata, I. e Sakaji, A. (a cura di)
 2008 *Physics of Emergence and Organization*, Singapore, World Scientific.
- Licata, I.
 2008a *La logica aperta della mente*, Torino, Codice.
 2008b *Logical Openness in Cognitive Models*, in «Epistemologia», 31, pp. 177-192.
 2008c *Emergence and Computation at the Edge of Classical and Quantum Systems*, in *Physics of Emergence and Organization*, a cura di I. Licata e A. Sakaji, Singapore, World Scientific.
 2009a *Vivere con l'incertezza radicale. Il caso esemplare del Folding Protein*, in «Riflessioni sistemiche», 1, pp. 66-74.
 2009b *Osservando la sfinge*, Roma, Di Renzo Editore.
 2010 *Almost-Anywhere Theories: Reductionism and Universality of Emergence*, in «Complexity», 15, pp. 11-19.
 2011a *Complessità. Un'introduzione semplice*, Palermo, Due Punti Editori.
 2011b *È possibile una teoria generale del cambiamento?*, in «Riflessioni sistemiche», 5, pp. 98-107.
 2012a *Complessità in fisica: che cos'è il cambiamento?*, in «Nuova civiltà delle macchine», 4.
 2012b *Epistemologia adattativa. Vedere con i modelli*, in «Reti, Saperi, Linguaggi», 4, 1, pp. 9-16.
 2012c *Sistemi, modelli, organizzazioni. Management & Complessità*, Roma-Messina, Corisco edizioni.
 2013 *Transaction and Non Locality in Quantum Field Theory*, in «European Journal Physics», in press.
- Magari, R.
 1986 *Morale e metamorale. Un approccio probabilistico ai problemi morali*, Bologna, Clueb.

- Matsumoto, K. e Tsuda, I.
1983 *Noise-induced Order*, in «Journal of Statistical Physics», 31, pp. 87-106.
- Maturana, H. e Varela, F.
1980 *Autopoiesis and Cognition. The Relation of the Living*, Dordrecht, Reidel; trad. it. A. Stragapede, *Autopoiesi e cognizione. La realizzazione del vivente*, Venezia, Marsilio, 1985.
- Minati, G. e Pessa, E.
2006 *Collective Beings*, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer.
- Minati, G. e Guberman, S.
2007 *Dialogue about Systems*, Milano, Polimetrica.
- Minati, G. e Licata, I.
2012 *Meta-Structural Properties in Collective Behaviours*, in «International Journal of General Systems», 41, 3, pp. 289-311.
- Minati, G.
2008 *New Approaches for Modelling Emergence of Collective Phenomena. The Meta-Structures Project*, Milano, Polimetrica.
- 2009 *The Dynamic Usage of Models (DYSAM) as a Theoretically-Based Phenomenological Tool for Managing Complexity and as a Research Framework*, in *Cybernetics and Systems Theory in Management: Tools, Views, and Advancements*, a cura di S.E. Wallis, Hershey, Penn., IGEI Global, pp. 176-190.
- Minati, G., Penna, M.P. e Pessa, E.
1998 *Thermodynamical and Logical Openness in General Systems*, in «Systems Research and Behavioural Science», 15, 2, pp. 131-145.
- Mlodinow, L.
2009 *La passeggiata dell'ubriaco. Le leggi scientifiche del caso*, Milano, Rizzoli.
- Nelson, E.
2001 *Dynamical Theories of Brownian Motion*, Princeton, NJ, Princeton University Press.
- Parisi, D.
2001 *Simulazioni. La realtà rifatta nel computer*, Bologna, Il Mulino.
- Pattee, H.H.
1978 *The Complementarity Principle in Biological and Social Structures*, in «Journal of Social and Biological Structure», 1, pp. 191-200.
- Peirce, C.S.
2008 *Esperienza e percezione. Percorsi nella fenomenologia*, Pisa, ETS Edizioni.
- Pessa, E.
1991 *La descrizione matematica delle strutture*, in «Biologia Forum/Rivista di Biologia», 84, pp. 91-100.

- 2006 *Physical and Biological Emergence: Are They Different?*, in *Systemic of Emergence*, a cura di G. Minati, E. Pessa e M. Abram, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer.
- 2009 *Towards A General Theory of Change*, in *Processes of Emergence of Systems and Systemic Properties*, Singapore, World Scientific.
- Piacentini, A.
- 2002 *Tra il cristallo e la fiamma. Le Lezioni americane di Italo Calvino*, Firenze, Atheneum Press.
- Pironio, S., Acín, A., Massar, S., Boyer de la Giroday, A., Matsukevich, D.N., Maunz, P., Olmschenk, S., Hayes, D., Luo, L., Manning, T.A. e Monroe, C.
- 2010 *Random Numbers Certified by Bell's Theorem*, in «Nature», 464, pp. 1021-1024.
- Preparata, G.
- 2001 *L'architettura dell'universo*, Napoli, Bibliopolis.
- 2002 *An Introduction to a Realistic Quantum Physics*, Singapore, World Scientific.
- Reichenbach, H.
- 2002 *La nascita della filosofia scientifica*, Bologna, Il Mulino.
- Ronald, E.M.A., Sipper, M. e Capcarrere, M.S.
- 1999 *Design, Observation, Surprise! A Test for Emergence*, in «Artificial Life», 5, pp. 225-239.
- Ryan, A.J.
- 2006 *Emergence is Coupled to Scope, not Level*, in «Complexity», 67, 2, pp. 67-77.
- Scott, A.C.
- 2007 *The Nonlinear Universe: Chaos, Emergence, Life*, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer.
- Sewell, G.
- 2002 *Quantum Mechanics and its Emergent Macrophysics*, Princeton, Princeton University Press.
- Siegfried, T.
- 2010 *È la matematica, bellezza! John Nash e la teoria dei giochi*, Torino, Bollati-Boringhieri.
- Steeb, W.H.
- 2008 *Nonlinear Workbook: Chaos, Fractals, Cellular Automata, Neural Networks, Genetic Algorithms, Gene Expression*, Singapore, World Scientific.
- Taleb, N.N.
- 2009 *Il cigno nero. Come l'improbabile governa la nostra vita*, Milano, il Saggiatore.
- Ulam, S.
- 1995 *Avventure di un matematico*, Palermo, Sellerio.

- Vamos, T.
 1993 *Epistemologia del computer. Le possibilità dell'impossibile. Vecchie idee mescolate a nuove*, Milano, Sperling & Kupfer.
- Vitiello, G.
 2001 *My Double Unveiled: The Dissipative Quantum Model of Brain*, Amsterdam, John Benjamins Pub Co.
 2009 *Io e il mio doppio. La dinamica coerente del cervello e l'emergere della coscienza*, in «La Medicina Biologica», 4, pp. 9-15.
- Vol'kenshtein, M.V.
 1988 *Complementarity, Physics, and Biology*, in «Soviet Physics Uspekhi», 31, pp. 140-150.
- von Foerster, H.
 1987 *Sistemi che osservano*, Roma, Astrolabio-Ubaldini.
- Wang, H.
 1997 *A Logical Journey: From Gödel to Philosophy*, Cambridge, MA, The MIT Press.
- William, J.
 2005 *The Dilemma of Determinism*, Whitefish, MT, Kessinger Publishing.
- Wolfram, S.
 2002 *A New Kind of Science*, Champaign, IL, Wolfram Media.
- Zbilut, J. e Giuliani, A.
 2009 *L'ordine della complessità*, Milano, Jaca Book.

