

Testo tratto da:
“*La Funzione d’onda della realtà*”
di Fausto Intilla
www.oloscience.com

Il Caos...patologico

“Tutto è vivo; ciò che chiamiamo morto è un’astrazione”

David Bohm

Ci si può chiedere a questo punto se i modelli del caos e delle reti interconnesse possano essere applicati allo studio della patogenesi delle malattie: la risposta è positiva ed in questo capitolo si forniranno alcuni esempi di tale nuovo approccio alla patologia. Le considerazioni che seguiranno sono sviluppate in gran parte sulla base di un ragionamento teorico e analogico che, per quanto suggestivo e utile a costruire modelli, deve essere sostanziato da dimostrazioni sperimentali per potersi dire a pieno titolo scientificamente fondato. Tali dimostrazioni si stanno oggi accumulando, ma si tratta pur sempre di studi-pilota e preliminari, la cui importanza per quanto riguarda una possibile applicazione clinica su larga scala resta ancora da determinare.

Quanto finora detto mostra che le oscillazioni biologiche e fisiologiche fanno parte della "regola" matematica che governa un sistema omeostatico per il semplice fatto che esso è organizzato a *feed-back*: esse sono quindi normali, anche in forma caotica, per determinati valori dei parametri di controllo di un sistema omeostatico. Tuttavia, ogni aspetto della fisiologia ha un suo versante

patologico e quindi si può logicamente chiedersi quali siano le "patologie" dell'omeostasi dal punto di vista della sua caoticità. La risposta a questa domanda è, da un certo punto di vista, abbastanza semplice: si può delineare l'esistenza di una patologia da "perdita di caoticità" ed una patologia da "aumento di caoticità". In altre parole, se è vero che ogni sistema biologico complesso tende a regolare l'intensità e la qualità delle proprie funzioni sulla base di un certo tipo di attrattore, è anche vero che la patologia insorge quando l'attrattore stesso cambia di dimensione (es. nel tipo di periodicità) o di struttura. Da questo punto di vista, l'origine della malattia potrebbe essere colto là dove c'è una biforcazione nelle dinamiche di uno o più sistemi biologici, sia in aumento di caoticità che in diminuzione. I sistemi biologici hanno molteplici parti che agiscono coerentemente per produrre una azione globale. Essi possono essere considerati come "*patterns*" collettivi meta-stabili di molti oscillatori più o meno accoppiati. La caoticità di ogni sistema conferisce ad esso la flessibilità tale da poter variare con facilità (cioè grazie a piccole influenze esterne) il proprio comportamento per adattarsi ai cambiamenti degli altri. Per questo, la patologia può cominciare come "perdita di connettività" tra gli elementi del sistema globale. Tale perdita di connessioni rende *meno complessa* la rete di comunicazioni, ma può aumentare la caoticità perché alcuni elementi (cellule, tessuti, organi) sfuggono al gioco dei controlli incrociati e iniziano ad oscillare in modo molto più marcato e disorganizzato. Quindi, se è vero che il caos di per sé non è un elemento negativo, in quanto è elemento di flessibilità e generatore di diversità, se si perde il coordinamento, la "connettività" del sistema nel suo insieme e con il resto dell'organismo, alcune sub-componenti possono oscillare in modo eccessivo, imprevedibile, generando quindi disordini localizzati che però possono essere amplificati (l'amplificazione delle fluttuazioni è un tipico comportamento dei sistemi caotici) e trasmessi ad altri sistemi in modo disordinato e afinalistico. L'oscillazione assume l'aspetto della malattia in quanto provoca l'emergere di sintomi e danni consistenti. E' come se il caos venisse amplificato e si formassero dei "nuclei" di interrelazioni patologiche tra cellule o sistemi, coinvolgenti anche il sistema connettivo, che in qualche modo

si isolano dal controllo generale e si automantengono. Al limite, variazioni troppo rapide ed intense delle variabili implicate in un sistema omeostatico possono configurare una situazione analoga a quella vista sopra per la funzione di Verhulst, allorché il parametro k superi un determinato valore: una situazione di *feed-back* positivo ed autodistruzione del sistema. D'altra parte, la distruzione di connessioni e/o la perdita di complessità di specifici sistemi (ad esempio: atrofia di tessuti, invecchiamento) può far *ridurre* le fini variazioni omeostatiche e caotiche, accompagnandosi a una semplificazione degli schemi omeostatici. In questo caso, si può anche ravvisare la patologia come perdita di caoticità. La sclerosi, ad esempio, rappresenta fisicamente una modificazione del connettivo con riduzione della flessibilità, della deformabilità ed, infine, della vitalità (atrofia).

Molte malattie riconoscono nella loro patogenesi, almeno nelle fasi iniziali, dei difetti della comunicazione che insorgono nelle reti complesse dei sistemi integrati (controllo della proliferazione cellulare, sistema immunitario, equilibrio tra fattori pro- e anti-infiammatori, ecc). In una rete in cui molti sistemi omeostatici (molecolari, cellulari, sistemici) sono interconnessi, l'informazione del sistema intero "percorre" dei cicli ("attrattori") che hanno forme spazio-temporali variabili, fluttuanti, ma sempre riconducibili, nello stati di normalità, ad uno schema armonizzato con il tutto visto nella sua globalità, schema finalizzato alla sopravvivenza dell'organismo, con il minore dispendio di energia possibile. Se uno o più elementi di tali reti perdono le connessioni informative, cioè il sistema omeostatico in sé si spezza, o si spezza il flusso di informazione tra diversi sistemi, si ha un processo patologico proprio in quanto si genera il caos, o, meglio, il sistema caotico passa in un altro attrattore. Tali modelli prevedono che il nuovo attrattore, nel caso considerato "patologico", possa conservarsi anche se la perturbazione iniziale (perdita di connessione) è solo temporanea (in patologia, si potrebbe parlare di *cronicizzazione*). Vi sono molti modi con cui un sistema integrato perde di complessità e di connettività e qui ne sono elencati

alcuni a titolo esemplificativo (in fondo, tutta la patologia potrebbe essere vista in questa ottica):

a) diminuzione del numero di elementi cellulari in gioco (vedi, ad esempio, processi di atrofia senile o per anossia cellulare).

b) alterazioni di numero o di sensibilità dei recettori quando essi sono troppo a lungo o troppo intensamente occupati, o quando sono direttamente attaccati dalla malattia (es.: miastenia grave), o quando sono geneticamente difettosi (es.: ipercolesterolemia familiare).

c) mancata produzione del segnale (es.: difetto anatomico o malattia di ghiandola endocrina) o sua intercettazione durante il percorso (interruzione di nervi, presenza di autoanticorpi verso proteine segnale).

d) difetto nei meccanismi intracellulari di trasduzione del segnale (dal recettore all'intero della cellula): si pensi ad esempio all'azione di tossine batteriche che mettono fuori uso le G-proteine, o all'adattamento delle stesse G-proteine nello scompenso cardiaco, o alla azione di molte sostanze farmacologicamente attive come i calcio-antagonisti o gli agenti che elevano l'AMPciclico, ecc... Molti oncogeni agiscono proprio su questi delicati passaggi del controllo della proliferazione.

E' certo che dinamiche caotiche sono presenti normalmente nell'omeostasi di reti a componenti multiple e incrociate come le citochine, i neuropeptidi, il sistema endocrino, le reti idiotipo-antiidiotipo, l'equilibrio HLA-recettori immunitari. La malattia autoimmunitaria viene oggi interpretata come un difetto di funzionamento del network immunitario. Il comportamento dinamico di cloni autoreattivi è alterato in quanto essi sono meno densamente connessi, cosicché essi si espandono e possono essere selezionati mutanti ad alta affinità per autoantigeni. E' stato riportato che gli schemi di fluttuazione degli anticorpi naturali sono alterati nell'uomo e nel topo affetti da malattie autoimmunitarie: le fluttuazioni sono o

totalmente ritmiche, o totalmente casuali (random), mentre nel normale le fluttuazioni hanno schemi caotici ma non totalmente casuali (cioè una situazione intermedia tra i due estremi) [Varela and Coutinho, 1991]. E' interessante il fatto che gli stessi autori sopra citati suggeriscono che la comprensione di queste dinamiche porterebbe a modificare i convenzionali schemi terapeutici: piuttosto che sopprimere in modo aspecifico l'immunità, il trattamento dovrebbe rinforzare il network immunitario stimolando la connettività delle regioni variabili di recettori e anticorpi. Di fatto, una prima applicazione di questo principio è l'indicazione, emersa di recente, di somministrare immunoglobuline naturali in una serie di malattie autoimmunitarie. Un'applicazione dei modelli del caos riguarda anche l'epidemiologia delle malattie infettive: l'insorgenza e la ricorrenza di epidemie ha un andamento ciclico, come è ben noto, ma irregolare, ha dinamiche che sono state analizzate con la matematica del caos [May, 1987; Olsen and Schaffer, 1990; Blanchard, 1994]. Ad esempio, pare che le epidemie di varicella presentano una variabilità in cui si possono comunque evidenziare andamenti temporali del tipo di ciclo-limite, con periodo di un anno, mentre le epidemie di rosolia mostrano un andamento tipicamente caotico, cioè più irregolare e più sensibile all'influenza di piccoli fattori climatici o ambientali [Olsen and Schaffer, 1990]. Seguono altri esempi di disordini dell'omeostasi, in cui sono stati descritti dei comportamenti fisiopatologici che si possono ricondurre essenzialmente a "deficit" o ad "eccesso" di caoticità. Nelle persone sane, l'insulina è secreta con pulsazioni che si ripetono ogni 12-15 minuti, comandate da un "*pacemaker*" pancreatico probabilmente influenzato dal nervo vago. L'insulina secreta in pulsazioni è metabolicamente più efficiente nel mantenere i normali livelli di glucosio ed è significativo il fatto che l'irregolarità o persino la perdita di tali oscillazioni è la più precoce anomalia rilevabile nella secrezione di insulina in pazienti con diabete di tipo 2 [Polonsky et al., 1988; Holffenbuttel and Van Haeften, 1993]. Nel diabete di tipo 2 il controllo metabolico è ovviamente disregolato, e finora nella valutazione dell'andamento clinico si è posta molta attenzione alla quantità assoluta di glucosio presente nel sangue (oltre ad altri parametri quali le emoglobine glicosilate, che documentano in

qualche modo l'effetto di tale disregolazione sulle proteine). Recenti evidenze mostrano che un altro fattore che può essere considerato è rappresentato dalla *variabilità* della glicemia, cioè dalla sua instabilità nel tempo, indipendentemente dal livello assoluto. A questo proposito, è degno di citazione uno studio condotto per valutare se il controllo della glicemia nei pazienti diabetici anziani è una determinante significativa della mortalità [Muggeo et al., 1995]. Il glucosio plasmatico (a digiuno) è stato misurato ripetutamente nel corso di tre anni in un ampio numero di pazienti, quindi è stata valutata la mortalità nei successivi cinque anni. La mortalità maggiore non è risultata associata alla concentrazione media del glucosio, bensì alla sua variabilità (misurata come coefficiente di variazione rispetto alla media, in ripetute misurazioni). In altre parole, il gruppo di pazienti con CV maggiore (per la precisione $> 18.5\%$) aveva una probabilità di sopravvivenza significativamente inferiore al resto dei pazienti con la stessa malattia e il CV è risultato una variabile indipendente dalla media della glicemia. La patogenicità del disordine metabolico non pare quindi legata tanto alla iperglicemia, quanto all'ampiezza delle sue oscillazioni, legate alla inefficienza del controllo ormonale. Gli autori concludono suggerendo che per un buon controllo del diabete nell'anziano si dovrebbe considerare non solo il parametro quantitativo medio ma anche la sua stabilità. Applicazioni della teoria del caos sono state avanzate in cardiologia. È stato riportato [Goldberger et al., 1991] che la frequenza cardiaca di un individuo sano varia nel tempo con periodicità intrinsecamente caotica e non, come si riteneva finora, secondo un normale ritmo sinusale influenzato solo dai sistemi omeostatici. Osservando tali variazioni secondo scale temporali diverse (minuti, decine di minuti e ore) si vedono fluttuazioni simili, che ricordano un comportamento frattale, nel dominio del tempo anziché in quello dello spazio. Non si tratta, ovviamente, di aritmia, ma di oscillazioni del ritmo normale. Il battito cardiaco normale non è perfettamente regolare nei soggetti sani, ma presenta ampie variazioni che mostrano dinamiche caotiche, mentre soggetti con scompenso cardiaco congestizio hanno minore variabilità nella frequenza cardiaca. La variabilità nel ritmo diminuisce in corso di grave malattia coronarica, uso di digossina o cocaina ed anche semplicemente

nell'invecchiamento [Casolo et al., 1989]. La morte cardiaca improvvisa è preceduta da periodi in cui si è evidenziata la scomparsa del caos normale e l'insorgere di una periodicità più regolare ma, proprio per questo, patologica [Kleiger et al., 1987; Goldberger and West, 1987].

La fibrillazione ventricolare potrebbe, a prima vista, apparire come il massimo della caoticità. Tuttavia, alla luce della teoria del caos, ciò non è esatto: vi è infatti una sostanziale differenza tra eventi contrattili totalmente casuali e slegati tra loro e comportamento caotico. Nell'analisi ECG del cuore in fibrillazione non è stato identificato nessun attrattore [Kaplan and Cohen, 1990a e 1990b], così che gli autori concludono che la fibrillazione appare come un segnale random non caotico. In psichiatria, si potrebbe considerare come esempio di perdita di caoticità l'insorgere di idee fisse o di ossessioni: mentre la psiche normale segue un attrattore "strano", ricco di variabilità pur con delle caratteristiche di stabilità (*patterns* psicologici, archetipi secondo Jung), nell'ossessivo emergono comportamenti stereotipati, ripetitivi o fissi, difficili da influenzare dall'esterno (se non con grosse dosi di farmaci o manovre estreme). Anche la patologia psichica spesso origina e trova consolidamento dalla perdita di capacità di comunicare con i propri simili (perdita di complessità e di flessibilità). L'importanza del caos nelle funzioni cerebrali è tale che alcuni autori si sono spinti a considerare questo fenomeno la base per la creatività intellettuale [Freeman, 1991] o addirittura il corrispondente fisiologico dell'esistenza di un libero volere [Crutchfield et al, 1986]. Freeman, professore di neurobiologia all'Università della California a Berkeley, riferisce: "I nostri studi ci hanno fatto anche scoprire un'attività cerebrale caotica, un comportamento complesso che sembra casuale, ma che in realtà possiede un ordine nascosto. Tale attività è evidente nella tendenza di ampi gruppi di neuroni a passare bruscamente e simultaneamente da un quadro complesso di attività ad un altro in risposta al più piccolo degli stimoli. Questa capacità è una caratteristica primaria di molti sistemi caotici. Essa non danneggia il cervello: anzi, secondo noi, sarebbe proprio la chiave della percezione. Avanziamo anche l'ipotesi

che essa sia alla base della capacità del cervello di rispondere in modo flessibile alle sollecitazioni del mondo esterno e di generare nuovi tipi di attività, compreso il concepire idee nuove" [Freeman, 1991].

Da una prospettiva ancora più ampia di discussione del problema, si è già avuto occasione di dimostrare come l'esercizio della libera volontà presupponga necessariamente che il suo strumento materiale (cervello) non sia rigorosamente deterministico, ma sia soggetto alla indeterminatezza inerente alla materia atomica (fluttuazioni quantistiche) ed alla materia vivente (sistemi lontani dall'equilibrio) [Zatti, 1993]. In neurologia, si è visto che l'anziano presenta una minore ramificazione delle cellule di Purkinje, quindi una riduzione della loro dimensione frattale [Lipsitz and Goldberger, 1992]. Particolari metodi di analisi basati sulle dinamiche non lineari hanno permesso di paragonare gruppi di soggetti giovani e anziani per quanto riguarda la complessità del ritmo cardiaco e delle variazioni di pressione [Kaplan et al., 1991]. Si è visto che tale complessità è ridotta nel corso dell'invecchiamento. Per questo alcuni sostengono che la misura della complessità basata sulla teoria del caos e dei frattali può fornire un nuovo strumento per monitorare l'invecchiamento e testare l'efficacia di interventi indirizzati specificamente a modificare il declino di capacità adattativa che avviene con l'età [Lipsitz and Goldberger, 1992]. L'idea di "padroneggiare il caos" pare molto attraente in un'ampia serie di campi di ricerca! [Ditto e Pecora, 1993; Shinbrot et al., 1993]. La comparsa di crisi epilettiche si associa ad una perdita di caoticità nelle onde cerebrali e comparsa di treni di impulsi periodici a partenza da determinati focolai [Babloyantz and Destexhe, 1986; Schiff et al., 1994]. Nel campo dello studio dell'epilessia è stato utilizzato il concetto di "dimensione frattale" per analizzare l'evoluzione temporale delle onde EEG. La computazione dei dati di ratti normali ha consentito di costruire un attrattore di dimensione 5.9, mentre l'attrattore durante le crisi epilettiche aveva una dimensione di 2.5, quindi indicava un grado minore di caoticità. È stato suggerito che in questo caso la dimensione frattale correla con la flessibilità e adattabilità dell'organismo.

In un elegante esperimento eseguito su preparato di cervello di ratto si è data una dimostrazione di come controllare il caos in un sistema vivente [Schiff et al., 1994]. In una fettina di ippocampo mantenuta in bagno di coltura la attività neuronale è rappresentata da scariche a impulsi con tipico comportamento caotico (periodicità instabile), che può essere registrato al computer. Impulsi elettrici intermittenti somministrati ad appropriati intervalli temporali ("*periodic pacing*"), calcolati dal computer sulla base dell'andamento della scarica spontanea, sono in grado di regolarizzare la periodicità della scarica della popolazione neuronale. D'altra parte, certi tipi di preparazioni hanno un comportamento periodico spontaneo, che può essere "*anticontrollato*" per indurre il caos. Gli autori suggeriscono che questo modello potrebbe trovare applicazione nel controllo *in vivo* dei foci epilettici, che hanno alcune caratteristiche tipiche di periodicità instabile. Riduzione di complessità (misurata come riduzione della dimensione frattale) si è osservata nelle trabecole ossee in caso di osteoporosi [Benhamou et al., 1994]. Secondo alcuni autori [Caldwell et al., 1994], la dimensione frattale fornisce una informazione qualitativa sulla *struttura* dell'osso (espressa però in termini quantitativi), che va ad aggiungersi, integrandola con nuovi significati, alla informazione puramente quantitativa fornita dalla tradizionale densitometria ossea. La misura della irregolarità della forma è stata utilizzata in studi-pilota anche nella diagnostica istopatologica dei tumori [Landini and Ripin, 1994]. Mentre il profilo di una sezione della mucosa normale del pavimento della bocca è risultata avere una dimensione frattale di 0.97, quello di una sezione di un carcinoma aveva dimensione di 1.61, documentando quindi in termini numerici la maggiore irregolarità. Forme di cheratosi con severa displasia davano valori intermedi. La membrana delle cellule leucemiche (leucemia "*hairy-cell*") ha una dimensione frattale tra 1.29 e 1.37, mentre quella dei linfociti T normali è tra 1.12 e 1.23 [Nonnemacher, 1994]. E' chiaro che per fare la diagnosi in questo caso non servono complicati calcoli matematici, essendo determinanti l'osservazione al microscopio ottico e l'immunocitochimica, ma è pure significativo il fatto che si sia trovato un modo per trasformare un giudizio qualitativo (e per questo in un certo modo soggettivo) in un numero oggettivo.

L'organizzazione frattale può essere studiata anche su sistemi in coltura di tessuti o di microrganismi. Per quanto riguarda i primi, si può citare lo studio della ramificazione dei piccoli vasi nella membrana corion-allantoidea del pollo [Kurz et al., 1994]. La velocità di crescita delle cellule endoteliali e delle altre cellule che costituiscono la rete vasale è stata misurata sia come densità di cellule per area di superficie che come dimensione frattale. Si è visto, tra l'altro, che l'aggiunta di un fattore di crescita (*Vascular Endothelial Growth Factor*) aumenta il numero di cellule ma aumenta anche la dimensione frattale (da 1.4 a 1.8 circa) dei vasi neoformati: esso interviene quindi nella organizzazione delle ramificazioni e nell'aumento di complessità. Per quanto riguarda i microrganismi, ad esempio, sono state misurate, in colonie fungine crescenti su agar, le variabili come la "rugosità", la "altezza" e la "autosomiglianza" delle colonie. Tali variabili dipendono dalla concentrazione del glucosio nel mezzo in modo indipendente l'una dall'altra [Matsuura and Miyazima, 1994]. Un aggravamento della situazione caotica nella secrezione di ormoni nell'insufficienza cardiaca è stato messo in evidenza da Nugent e collaboratori [Nugent et al., 1994]. In sintesi, tali autori hanno misurato la concentrazione ematica di peptide atriale natriuretico (ANP) ogni 2 minuti per un periodo di 90 minuti. Nel soggetto sano si notano marcate e irregolari oscillazioni (la concentrazione varia da 2 a 60 ng/l), nel soggetto malato (insufficienza cardiaca cronica) si notano oscillazioni di ampiezza molto maggiore (da 2 a 400 ng/l). In questi casi, quindi, si potrebbe dire che la caoticità è peggiorata, nel senso osservato nella nostra progressione matematica con la funzione di Verhulst, in cui aumentando il parametro k aumentava l'ampiezza dei picchi. Tuttavia, bisogna precisare che in alcuni pazienti (5 su 27) sono comparsi dei picchi di concentrazione (fino a circa 2000 ng/l) con una periodicità molto più evidente (ogni 10-12 minuti). In questi casi, quindi, all'aumento ulteriore di concentrazione dell'ormone, si accompagna la comparsa di maggiore periodicità (ordine nel caos!). Uno di questi pazienti morì poco dopo per molteplici embolie polmonari, a conferma del fatto che la situazione era estremamente grave.

Una forma particolarmente grave di aumento di caoticità si può verificare in tutte quelle situazioni in cui la perdita di controllo omeostatico per ragioni esterne al sistema stesso si accompagna a incapacità del sistema di compensare la perturbazione indotta. A questo proposito si possono fare i seguenti esempi di catene consequenziali di eventi patologici (riportati con inevitabili semplificazioni):

a) shock ---> vasocostrizione compensatoria ---> ipoperfusione ---> danno cellulare ---> vasodilatazione ---> ipotensione ---> shock, ecc...;

b) ipertensione ---> vasocostrizione ---> ipoperfusione renale ---> attivazione del sistema renina/angiotensina ---> ipertensione, ecc...;

c) lesione cellulare per anossia ---> deficit di energia ---> mancata funzione delle pompe di membrana ---> ingresso di calcio ---> eccitazione cellulare ---> aumento di consumo di energia ---> deficit di energia, ecc...

d) infezione da HIV ---> distruzione dei linfociti ---> immunodeficienza ---> infezione ---> attivazione del sistema immunitario ---> attivazione del virus latente ---> replicazione del virus ---> distruzione dei linfociti, ecc...

In tutti questi casi, riguardanti sia il piano clinico che quello biologico-cellulare, si può parlare di situazioni di autoamplificazione della deviazione dalla normale omeostasi, situazioni dette anche circoli viziosi. Con riferimento all'ipotesi dell'esistenza di processi caotici nel cervello, è importante segnalare il contributo del neuroscienziato americano Walter Freeman, impegnato da oltre trent'anni nello studio delle dinamiche caotiche cerebrali (soprattutto con riferimento alla percezione olfattiva). In un suo recente libro, Freeman sottolinea che l'enorme complessità del cervello dà ragione dell'inadeguatezza, nello studio delle dinamiche cerebrali, del modello causale lineare, del tipo sensazione/input -

elaborazione - output/risposta. Il cervello deve essere considerato un sistema dinamico altamente complesso: esso contiene circa dieci miliardi di cellule nervose o neuroni, connessi tra loro in un'intricatissima rete non continua mediante mille miliardi di contatti sinaptici discontinui. Secondo l'autore, il funzionamento di una tale rete può essere compreso solo ricorrendo al modello fornitoci dalla moderna teoria dei Sistemi Dinamici non lineari (o complessi), la cui proprietà fondamentale è quella dell'*auto-organizzazione* o *emergenza*: già sistemi molto più semplici di quelli viventi, come ad esempio uno strato di fluido o una miscela di prodotti chimici, caratterizzati da un alto numero di entità microscopiche interagenti, sotto certe condizioni possono generare delle proprietà globali macroscopiche che non esistono al livello delle entità di base e che vengono designate appunto come "fenomeni emergenti".

Tali proprietà globali dipendono dalle configurazioni (*patterns*) risultanti da interazioni non lineari tra le entità elementari. Da un punto di vista fisico questo legame non lineare è dato dai cosiddetti "anelli di retroazione" (*feedback loops*) in cui le componenti del sistema si connettono circolarmente, in maniera tale che ogni elemento agisce sul successivo, finché l'ultimo ritrasmette l'effetto al primo. Grazie a questa disposizione circolare l'azione di ciascun elemento risentirà e in qualche modo verrà influenzata da quella degli altri. Ciò consentirà al sistema di autoregolarsi, fino al raggiungimento di uno stato di equilibrio dinamico, nel quale gli elementi che compongono il sistema vengono vincolati da quello stato globale che essi stessi hanno generato cooperando insieme.

L'interazione circolare o ad anello consente dunque al sistema di auto-organizzarsi spontaneamente senza che ci sia alcun agente esterno che controlli tale organizzazione. La ricerca di questo scienziato è innovativa già a partire dal metodo d'indagine utilizzato: anziché studiare la risposta delle singole cellule nervose di animali immobilizzati, sottoposti a stimoli esterni, Freeman ha introdotto alcuni elettrodi nel bulbo olfattivo di conigli liberi di muoversi. Mentre l'animale interagiva liberamente con l'ambiente, annusando

alcuni oggetti, Freeman ha misurato, mediante elettroencefalogramma, l'attività neuronale di quella particolare area della corteccia. Dopo aver analizzato le fasi ottenute da elettroencefalogrammi prima e durante la percezione di un odore noto, ed averle rappresentate nello spazio come forme generate da un modello al computer, Freeman conclude che le forme ottenute, irregolari ma ancora strutturate, rappresentano attrattori caotici. Ogni attrattore corrisponde al comportamento assunto dal sistema per effetto di un particolare stimolo, per esempio una sostanza odorosa ben conosciuta. Il modello interpreta un atto percettivo come un balzo esplosivo del sistema dinamico dal "bacino" di un attrattore caotico a quello di un altro: in altri termini, in risposta allo stimolo esterno i neuroni danno vita ad un'attività collettiva globale (registrata dall'EEG) "caotica", ma dotata di una certa struttura ordinata, e se lo stimolo muta anche minimamente, i neuroni di colpo generano simultaneamente un'altra configurazione, piuttosto complessa ma pur sempre ordinata. Secondo l'autore, queste stesse dinamiche possono essere dimostrate anche per le altre percezioni, come quella visiva. In conclusione, Freeman afferma che: *“Un notevole vantaggio che il caos può conferire al cervello è che i sistemi caotici producono continuamente nuovi tipi di attività. A nostro parere queste attività sono decisive per lo sviluppo di raggruppamenti di neuroni diversi da quelli già stabiliti. Più in generale la capacità di creare nuovi tipi di attività può essere alla base della capacità del cervello di formulare intuizioni e di risolvere i problemi per tentativi ed errori”*.

L'esistenza di processi non-locali è una delle qualità base dell'inversione della freccia del tempo e deve perciò essere intesa come una qualità base di tutti i processi sintropici, non ultimi i sistemi in cui operano attrattori o che possono essere descritti solo ricorrendo alla scienza del caos. Poiché i sistemi viventi e i processi cerebrali sono tipici esempi di sistemi sintropici, è inevitabile la considerazione che la supercausalità e la non-località devono essere qualità tipiche dei sistemi viventi ed in modo particolare dei processi cerebrali. Ne consegue, ad esempio, che i processi cerebrali debbano presentare la co-presenza di caos e ordine (caratteristiche tipiche dei processi non-

locali e degli attrattori/sintropia): il caos nasce dal fatto che si attivano processi non meccanici, non determinabili, mentre l'ordine nasce dal fatto che i sistemi sintropici, attraverso l'azione degli attrattori, portano inevitabilmente ad una riduzione dell'entropia e ad un aumento della differenziazione e dell'organizzazione. Questo fatto è particolarmente evidente nei processi cerebrali, processi nei quali coesistono caos, complessità e ordine.

King afferma che "l'interazione tra cause che non sono tra loro contigue si manifesta sotto forma di un'apparente situazione caotica che può quindi essere studiata solo da un punto di vista probabilistico. In altre parole, i processi caotici che si osservano nel sistema nervoso possono essere il risultato di un comportamento apparentemente casuale di tipo probabilistico, in quanto non è locale sia nello spazio come nel tempo stesso. Ciò potrebbe, ad esempio, consentire ad una rete neurale di connettersi a livello sub-quantico con situazioni non-locali nello spazio e nel tempo, e quindi spiegare il motivo per cui i comportamenti risultino attualmente non determinabili per mezzo delle tecniche classiche computazionali. L'interazione quantica renderebbe le reti neurali analoghe ad assorbitori e trasmettitori di particelle e di anti-particelle." King prosegue affermando che il modello della supercausalità combina un approccio riduzionista, in cui i fenomeni biologici vengono ridotti a modelli fisici e chimici, con un approccio quantistico che rende, di conseguenza, l'intero sistema non determinabile. Infine, l'autore conclude affermando che il libero arbitrio nasce dal fatto che ogni nostra cellula e processo è costantemente obbligato a scegliere tra informazioni che vengono dal passato (onde divergenti, emettitori-entropia) e informazioni che vengono dal futuro (onde convergenti, assorbitori-sintropia). Il modello della supercausalità suggerisce perciò che a livello macroscopico i sistemi neuronali debbano presentare costantemente caratteristiche caotiche. Di questo apparente caos si alimentano i processi della coscienza che sono fondamentalmente di tipo sintropico e quindi non riproducibili in laboratorio o grazie a tecniche computazionali.

Jeffrey Satinover in un recente libro suggerisce che una risposta a tutto ciò può essere ricercata nel fatto che nel cervello umano esistono strutture che sembrano perfettamente designate alla cattura degli effetti quantici, e alla loro amplificazione. Se così fosse, le azioni generate dal cervello, e dalla società umana nel suo complesso, potrebbero condividere (almeno in parte) la libertà assoluta, il mistero e la non-meccanicità del mondo quantico. Nel lontano 1948 Luigi Fantappiè, lavorando su considerazioni analoghe a quelle di King e di Satinover, avanzava l'ipotesi che nel momento in cui i processi all'interno dei sistemi viventi sono di tipo sintropico, quindi strettamente legati alle caratteristiche della meccanica quantistica, e nel momento in cui passato, presente e futuro coesistono, nascono automaticamente una serie di ipotesi estremamente suggestive in merito al funzionamento del cervello. In proposito Fantappiè fa un semplice esempio limitato alla memoria. Le proprietà della meccanica quantistica suggeriscono infatti che la memoria possa funzionare secondo processi non-locali nello spazio tempo e quindi in modo estremamente diverso da quello fino ad oggi proposto da biologi e neuropsicologi. Dalla coesistenza di passato, presente e futuro e dalla non-località dei processi quantistici deriva infatti la possibilità di flussi istantanei e non-locali di informazione tra punti distanti dello spazio e del tempo. Di conseguenza è possibile immaginare la memoria come un insieme di processi "quantici" in cui l'informazione viene prodotta/ricordata stabilendo collegamenti non-locali. Secondo questa ipotesi, quando ricordiamo eventi passati il cervello si collegherebbe all'evento non-locale, ma tuttora presente nello spazio-tempo, e il ricordo verrebbe attinto direttamente da tale collegamento e non da "magazzini" di memoria all'interno del nostro cervello. Questa ipotesi, estremamente suggestiva e a distanza di 60 anni ancora estremamente azzardata, potrebbe costituire un importante contributo alla comprensione di un fenomeno complesso come la memoria umana. In definitiva, l'allargamento della scienza psicologica alle qualità di non-località della fisica quantistica e alle qualità della **sintropia**⁹, e l'adozione della metodologia relazionale accanto alla metodologia sperimentale, aprirebero la strada a studi scientifici in grado di affrontare tutte quelle tematiche attualmente escluse dalla

psicologia in quanto considerate al di fuori della scienza (ad esempio, la parapsicologia). A tal fine è interessante sottolineare il senso diffuso di insoddisfazione che si percepisce tra gli studenti di psicologia che, in genere, si iscrivono a questa facoltà con la speranza di scoprire la scienza dell'anima, per poi trovarsi imbrigliati in una disciplina che, nel tentativo di essere scientifica, utilizza paradigmi e metodologie di un "fisicalismo" ormai sorpassato da più di un secolo nella stessa fisica. Questa resistenza della psicologia ad aprirsi ai nuovi paradigmi della meccanica quantistica ha ridotto la psicologia ad una disciplina che in modo arbitrario cerca di ridurre la coscienza, la psiche e le emozioni ai soli aspetti meccanici e computazionali, creando in questo modo una contraddizione di fondo per la quale si tenta di indagare con un approccio entropico processi e fenomeni che nei fatti sono di natura sintropica.