



## Complessità e complicazione

### *1. Due tipi di scienza*

Perché solo recentemente si discute di complessità?

Finché un programma scientifico era visto come una esplorazione parziale di un universo mai esauribile, era pacifico che qualunque sistemazione scientifica (teoria o modello) fosse una descrizione di alcuni aspetti, fatta con gli strumenti disponibili, i quali non pretendevano di esaurire tutto l'accessibile.

Ciò non creava alcun problema di complessità; la descrizione scientifica era per definizione semplice, senza escludere che la complessità potesse risiedere nel mondo .

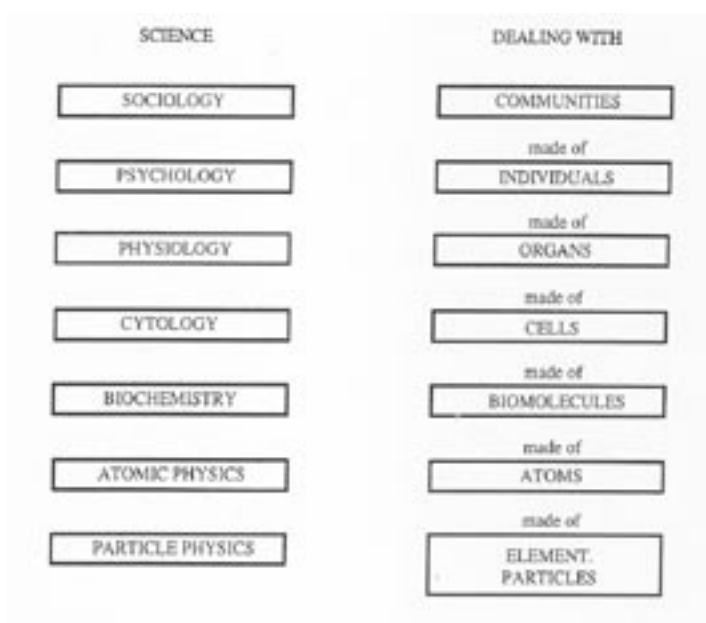


Fig. 1- Gerarchia dei livelli di realtà e delle corrispondenti descrizioni scientifiche



In Fig 1, ogni scienza, che è associata a un certo livello di organizzazione del mondo, avrà un suo proprio protocollo e una certa classe di apparati di misura. P. W. Anderson in “More is different” pubblicato su Science nel 1972, critica il costruzionismo che pretende di spiegare qualunque livello di realtà in termini dei componenti già descritti al livello inferiore, e cpsi via, fino a ricondurre tutto a particelle elementari, rispolverando il sogno metafisico di Democrito. Questo costruzionismo deriva da una visione puramente formalistica del programma scientifico.

Il formalismo di inizio ‘900 pretende di esaurire tutto il conoscibile, raccogliendolo dentro un linguaggio formale, come illustrato in fig. 2a): ogni termine scientifico è privo di ambiguità, univoco, e da A si deduce, con le regole del linguaggio scientifico una ben precisa conseguenza B. Come a dire: ciò di cui non si può parlare non esiste, nel senso che non è rilevante scientificamente; altri eventuali linguaggi (poetico, filosofico, ecc) si inventano dei fantasmi mentali privi di realtà.

In a) si rappresenta il programma della fisica a cavallo fra ‘800 e ‘900, come discusso nei dibattiti epistemologici da H. Poincaré, L. Boltzmann e E. Mach: si esplora un set di oggetti pre-assegnato; solo sintassi, fattibile da una macchina di Turing (tesi di Church-Turing); analogo programma di Hilbert in matematica, limitato (1931) da K. Gödel: incompatibilità di completezza e coerenza.

Se ora si aumenta il numero di oggetti in A e in B, il tempo di macchina o le risorse di memoria necessarie possono crescere in modo esponenziale: è quel che in computer science si chiama complessità algoritmica, e che più modestamente - in vista dei problemi pratici che crea - possiamo chiamare complicazione, in quanto non introduce nuovi aspetti qualitativi nell’ambito sintattico in cui ci siamo confinati.

Ben differente è il ruolo delle parole A e B nelle scienze dello spirito (fig. 2b) Provocatoriamente, Wilhelm Dilthey oppone alla *Critica della ragion pura* di Kant una *Critica della ragione storica*.

Ogni parola è polisemica, possiede una pluralità di significati (definizione operativa di significato: il valore decisionale che il soggetto gli attribuisce, attivando specifiche risposte motorie e/o linguistiche); una connessione grammaticale fra A e B non è univoca, ma si presta a molte interpretazioni.



Su questo fanno aggio tutti i sofisti. Con Dilthey il problema dell'ermeneutica, fino ad allora puramente linguistico, acquista una valenza filosofica (sviluppi: M. Heidegger, H. Gadamer, P. Ricoeur, C. Perelman).

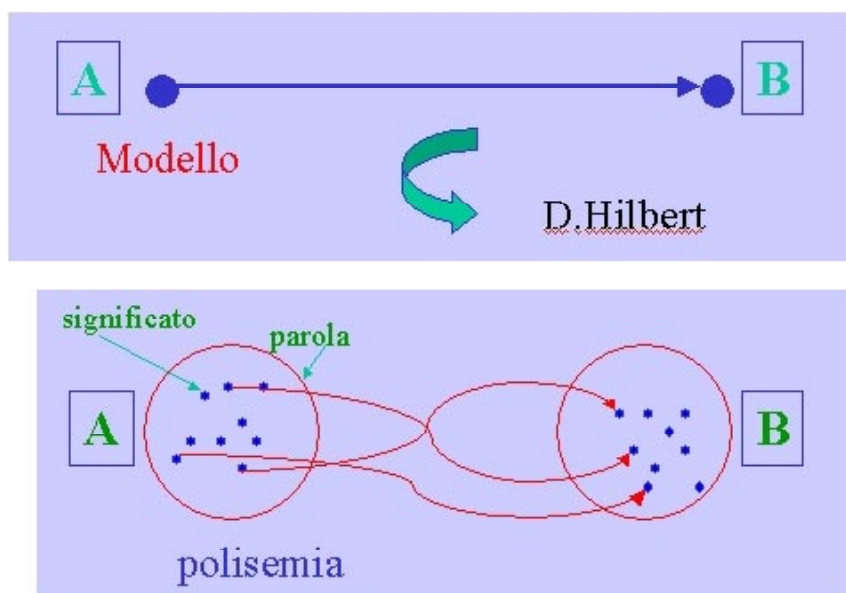


Fig. 2- Dualismo (Gap) fra: a) scienze fisiche e b) scienze umane (o dello spirito).

## 2. Complessità formale, algoritmica, semantica - Come tradurre il vissuto percettivo in una lingua con lessico limitato

La complessità nasce dal tentativo di una costruzione logica del mondo a partire dalle “affezioni quantitative” in cui frantumiamo un oggetto di esperienza, piuttosto che “tentarne l’essenza” (Galileo, 1610).

Il tentativo è motivato dalla convinzione che si possa raggiungere una descrizione completa di un oggetto di esperienza attraverso i suoi “atomi di significato” (es. della mela: odore, colore, sapore, forma etc., oppure, più radicalmente, gli atomi di cui è composta la mela). Ogni oggetto diventa così un elemento definito di un insieme di Cantor (vedi R. Carnap, 1931: *La costruzione logica del mondo*).

Tre limiti a questo programma riduzionistico corrispondono a tre possibili



caratterizzazioni della complessità, *formale, algoritmica e semantica*.

a) *formale*

(1931, Gödel)

teorema di *indecidibilità*: estraendo tutti le possibili conseguenze da un corpo finito di assiomi, prima o poi si arriva a una proposizione indecidibile all'interno della teoria (cioè basandosi sul corpo di assiomi); l'equivalente "macchinistico" fu enunciato da Turing 1936, come impossibilità di una macchina universale di calcolo (cioè un computer) di fermarsi completando l'esecuzione per un generico input. Dunque, non possiamo costruire una teoria chiusa del mondo, cioè dedurre tutti gli aspetti della nostra esperienza a partire da un numero finito di assiomi.

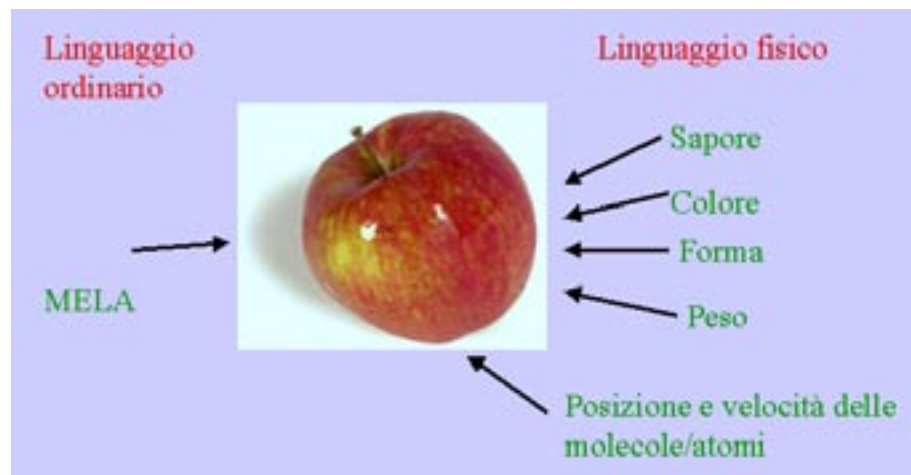


Fig. 3- Come nascono le parole della scienza

b) *algoritmica*

(~1970, Kolmogorov e Chaitin)

La complessità è il costo di un calcolo; ha pertanto due aspetti:

- *spaziale*: quantità di risorse di macchina da impegnare;
- *temporale*: tempo necessario all'esecuzione.

Esploriamo questo secondo aspetto. Sia  $t_1$  l'unità di tempo necessaria per descrivere un singolo elemento, e si abbiano  $N$  elementi. Se le loro proprietà si sommano (come i fagioli in un sacco) cioè se l'oggetto composto di  $N$  elementi è cresciuto per "giustapposizione", allora il tempo totale necessario  $T$  è:



$$T = N t_1$$

Se invece la crescita è per “intussuscezione” (uso un vecchio termine della filosofia della natura che vuol dire che gli elementi non si limitano a giustapporsi, ma si accoppiano fra di loro con modalità non prevedibili a partire da una ispezione del singolo elemento; es. tipico: una collezione di vocaboli di un lessico, disposti convenzionalmente in ordine alfabetico nel dizionario, e come invece si organizzano nel verso di un poeta) allora il tempo totale non è la semplice somma dei tempi individuali, e addirittura l’estensione (“size”) N del sistema composto può figurare ad esponente:

$$T' = (t_1)^N$$

P. es., sia  $t_1 = 1$  microsec =  $10^{-6}$  sec  $N=10$ , allora :

$$T = 10 t_1 = 10^{-5} \text{ sec}$$

e

$$T' = t_1^{10} = 10^{-4} \text{ sec}$$

Che è ancora praticabile (si tratta di meno di tre ore), ma se  $N=100$ , allora

$$T = 100 t_1 = 10^{-4} \text{ sec}$$

e

$$T' = t_1^{100} = 10^{94} \text{ sec}$$

Molto più lungo dell’età dell’universo che è circa :

$$10^7 \text{ sec/anno} \times 10^{10} \text{ anni} = 10^{17} \text{ sec.}$$

### c) *semantica*

La complessità semantica è la più fondamentale; essa rappresenta il limite della presunzione ideologica della fisica dei componenti elementari di essere l’unica descrizione rilevante del reale: il cosiddetto riduzionismo.

Supponiamo di scomporre una mela nelle sue *affezioni quantitative*, cioè nelle proprietà distinte che possiamo misurare: sapore, odore, colore, forma etc. Ognuno di questi *punti di vista* corrisponde ad un apparato di misura che fornisce un numero. Se abbiamo scelto un numero adeguato di indicatori, la collezione ordinata dei numeri corrispondenti a ciascuna misura dovrebbe caratterizzare una mela. Ciò può bastare per il rifornimento del magazzino di



un mercato, però non esaurisce la realtà della mela.

In effetti l'*intero* (la mela) precede le misure separate, che forniscono quantità derivate, non primitive: si appoggiano alla mela ma una volta enucleate (tecnicamente: *astratte*) non permettono la ricostruzione logica della mela. A parte una indecidibilità di Göedel-Turing o un aumento esponenziale del tempo di calcolo, non siamo mai sicuri che nel futuro non compaia un ulteriore *punto di vista* inedito che sia misurabile e che arricchisca la descrizione della mela. Si ricordi quanto detto sulla ricostruzione tomografica degli aspetti 3D di un oggetto.

Prendiamo l'esempio del genoma umano. Sono stati individuati 30.000 geni, cioè tratti di sequenze di basi che codificano proteine; ma unendo tutti i tratti si arriva all'1% della lunghezza totale del genoma; il 99% -non codificante- espleta delle funzioni che stiamo appena cominciando a chiarire. L'insorgere di correlazioni tra tratti diversi (per esempio un gene la cui espressione dipende dalle proteine codificate da altri geni) rende complesso il problema nel senso che non ne abbiamo esaurito il significato con il semplice elenco dei geni.

Gli esempi più convincenti vengono dalla linguistica. Sappiamo bene che prima nasce il linguaggio articolato, la poesia, le favole, e poi da queste si estrae un lessico. L'operazione inversa, partire dal vocabolario e programmare al computer un testo letterario, è fallimentare. In questo ordine di complessità rientra la traduzione da una lingua all'altra. Esistono macchinette per cavarsela alla stazione o al ristorante in Cina; ma per un testo elaborato, per esempio Omero, il traduttore non è automatico: piuttosto è un bilingue che vive le situazioni di Ulisse in Greco e le racconta in Italiano. Questo ruolo del traduttore è discusso in un bel libro: *Il grande codice: la Bibbia e la letteratura*, di Northrop Frye (Einaudi, 1986); l'autore si pone il problema: come mai la Bibbia scritta in Ebraico (lessico di 5.000 vocaboli) può essere tradotta in Inglese (il cui lessico comprende 500.000 vocaboli)? La risposta è che una procedura complessa come la traduzione letteraria non può essere tradotta in un elenco di operazioni di macchina, e perciò non può essere automatizzata.



### 3. Strumenti per affrontare la complessità

3.1. *Dinamica non-lineare*, biforcazioni multiple - stratificazione della realtà in livelli diversi (*“More is different”*, P. W. Anderson) – stabilità longitudinale e modelli locali (Landau) – stabilità trasversale e caos deterministico (fig. 4, 5).

La fig. 4 mostra come varia la stabilità di un sistema magnetico, rappresentando il paesaggio dell'energia con la transizione disordine-ordine all'abbassarsi della temperatura: a) diagramma tridimensionale; b) luogo dei minimi (linea intera) e massimi (linea tratteggiata) che mostra la biforcazione alla temperatura critica.

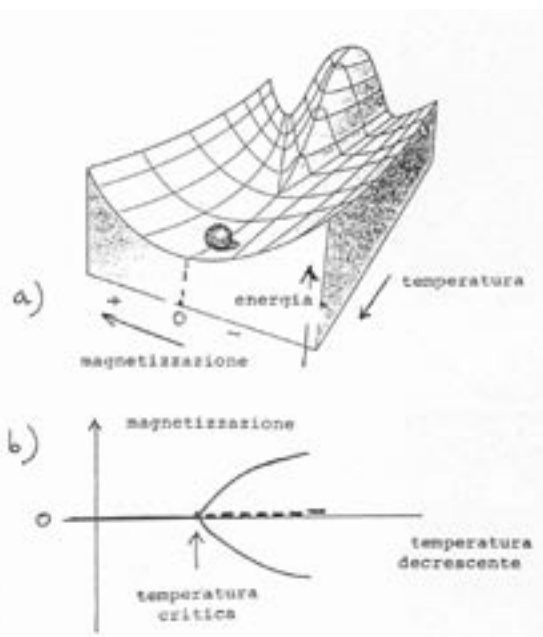


Fig. 4- Come ha luogo una biforcazione nei minimi di energia in funzione della magnetizzazione, al variare di un parametro di controllo (la temperatura)

3.2. *Feedback e strategie adattive* (v. fig. 5). Nel sogno riduzionistico di spiegare il tutto a partire da particelle elementari, l'evoluzione dell'Universo si presenta come un albero filogenetico, in cui la nascita delle varie forme corrisponde a una biforcazione tipo fig. 4. Ma qui è come aprire un vaso di Pandora. Una prima biforcazione crea due rami, da questi ne biforcano quattro,



e così via in modo esponenziale. Data la simmetria delle biforcazioni, ogni ramo è equiprobabile e si ha una distribuzione probabilistica piatta di risultati finali. Se invece la biforcazione avviene in presenza di un gradiente esterno (per intenderci: come un vento in fig. 4 che, quando la pallina non è più in fondo valle ma in cima a un colle, la costringe a cadere solo da una parte e non indifferentemente a destra o a sinistra). Come risultato, la presenza di disturbi esterni al sistema alla biforcazione forza una catena di scelte (i rami indicati con doppio tratto in fig. 5) e il risultato finale ha una altissima probabilità di accadimento.

Diremo complessità semantica l'informazione sugli aspetti dell'ambiente esterno che hanno forzato le scelte del nostro sistema, il quale perciò trova un significato nel mondo in cui è immerso. Per contro una pura evoluzione sintattica del sistema, pre-assegnato con le proprie specifiche, non coglie questo significato. La strategia adattiva consiste nel tentare la evoluzione sintattica del sistema, confrontare i risultati coi dati di misura, e correggere le assunzioni del formalismo per adeguare la soluzione all'esperienza. I dati di ingresso vengono dunque modificati da un feedback (rinvio all'indietro) dello scarto fra il calcolo e l'effettiva misura.

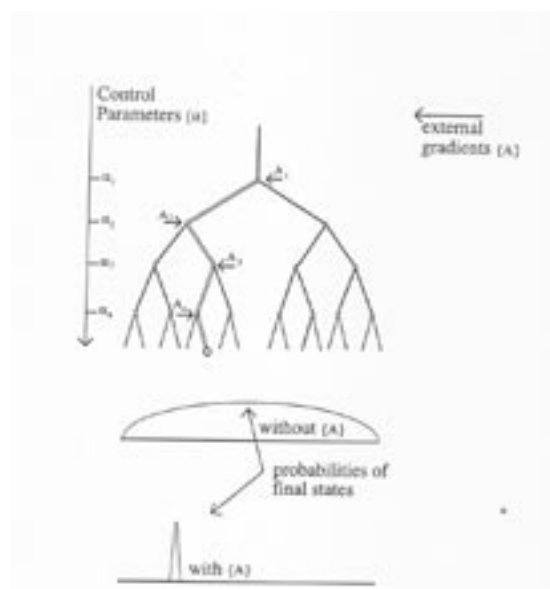


Fig. 5- Albero di biforcazioni in dinamica non lineare; in assenza di gradienti esterni tutti i rami sono equiprobabili; i gradienti forzano una scelta al punto di biforcazione





*3.3. Algoritmi genetici*, che mutuano strategie evolvuzionistiche, attribuendo un premio alla strategia vincente; in tal modo per ogni problema fra una panoplia di strategie emerge la più opportuna.

*3.4. Reti e loro architettura*. Due motivi per cui la complessità algoritmica può essere alta:

a) perché la dinamica del singolo sistema è complicata, come accade per certi tipi di caos;

b) pur essendo il singolo sistema semplice, la connessione di un gran numero di essi in rete induce un costo di calcolo che dipende dalle modalità (architettura) dei mutui legami; lo studio delle reti offre dei modelli euristici per molte situazioni familiari, dalle interazioni sociali fra individui (guerre, epidemie, scambi commerciali) alle architetture a molti componenti (neuroni nel cervello, reti elettriche, telefoniche autostradali, aerolinee, sistemi elettronici integrati).

#### 4. Come misurare la complessità

*4.1 La complessità algoritmica di un sistema dinamico: attrattori, dimensioni frattali e informazione*. C'è una differenza osservabile fra il caos di Boltzmann e quello di Poincaré? Sì, e fondamentale. Nel primo caso (Boltzmann), la stocasticità delle fluttuazioni fa vagare il sistema su una regione dello spazio delle fasi che ha la dimensione  $N$  di tutto il sottospazio permesso dagli integrali primi del moto (per es., energia, ecc.). Le cose sono differenti per il caos deterministico di Poincaré. Riferiamoci, per semplicità, a sistemi *dissipativi*, per i quali, a partire da qualunque condizione iniziale, asintoticamente il sistema sarà confinato a una regione di dimensioni  $D$  minori di  $N$ . Consideriamo, per es., una dinamica in  $N=3$ . Gli attrattori associati a moti regolari, o ordinati, avranno  $D=0$  se sono *punti fissi*,  $D=1$  se *cicli limite*, o  $D=2$  se *tori* corrispondenti a moti periodici con due frequenze incommensurabili. Invece nel caso caotico, e quando i parametri delle equazioni sono aggiustati in modo da avere una direzione espandente, cioè una dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali, l'attrattore sarà un frattale, cioè avrà dimensione  $D$



frazionaria:  $2 < D < 3$ . L'attrattore frattale peculiare del caos deterministico è stato chiamato *attrattore strano*.

Queste differenze legate alla topologia dell'attrattore hanno un equivalente più suggestivo legato al contenuto d'informazione sul futuro del sistema, che si può avere osservando il sistema stesso per un certo lasso di tempo. Sia la dimensione sia l'informazione persa per unità di tempo sono *invarianti* del sistema, cioè caratteristiche intrinseche non legate a un cambiamento di rappresentazione; ma, mentre la dimensione è un invariante statico, l'informazione persa per unità di tempo è un invariante dinamico, detto *entropia metrica*, o *entropia di Kolmogorov*  $K$ .

$K$  risponde alla domanda: se osserviamo il sistema per un tempo così lungo che l'informazione per unità di tempo diventi invariante, che informazione abbiamo sul futuro? Orbene, la risposta è:

(a)  $K = 0$  per un sistema ordinato; infatti, in un sistema deterministico, una volta esauriti i transitori, non si ha un'extra d'informazione per un'extra di osservazione;

(b)  $K \rightarrow \infty$  per un sistema disordinato; infatti, per quanto a lungo si osservi un moto browniano, non si sa mai dove il sistema andrà a un istante successivo;

(c)  $K$  finito per un sistema caotico.

#### 4.2. La complessità biologica come complessità semantica

Uno dei problemi centrali della biologia evolutiva è se la complessità aumenta nell'evoluzione. Ci sono tre opinioni: che aumenti, che i dati disponibili siano insufficienti a decidere, che "non vi sia alcuna linea di progresso che caratterizzi la storia della vita" (S. J. Gould).

Non c'è neanche accordo su come definire la complessità. Finora ci siamo messi nell'ottica del fisico, che si interessa ai sistemi dinamici, e pertanto cerca la complessità dei processi; siccome questi sono computazioni, le misure di complessità in dinamica sono complessità computazionale; essa caratterizza l'informazione necessaria a predire lo stato futuro del sistema (o il simbolo



successivo in una sequenza simbolica) ma non si interroga sul significato in un mondo complesso.

Altre complessità di sequenze giostrano fra correlazioni a corto e lungo raggio in modo da dare la predizione ottimale del simbolo successivo della sequenza .

Invece, la complessità biologica deve rispondere su forma, o su funzione, o sulla sequenza che li genera. Noi sappiamo che la sequenza che codifica una proteina non ha alcuna relazione con la funzione, e pertanto le correlazioni fra simboli della sequenza non hanno rilevanza biologica. Invece, dobbiamo cercare correlazioni di questi simboli con aspetti dell'ambiente entro cui la sequenza è funzionale; cioè la complessità si riferisce all'informazione immagazzinata nella sequenza su un particolare ambiente.

Come si misura

L'entropia di una popolazione X di sequenze: se non c'è selezione, tutte le N sequenze sono equiprobabili e l'entropia (cioè l'incertezza associata) è:

$$H_{\max}(X) = \log N$$

Il numero dei genotipi è dato dalla grandezza dell'alfabeto dei monomeri (D=2 per bits, D=4 per DNA) elevato alla lunghezza L della sequenza, per cui l'entropia incondizionata, preso il logaritmo in base D , è L:

$$N = D^L \rightarrow H_{\max} = L$$

Se c'è selezione, le varie probabilità sono disuniformi.

Chiamando E (environment) l'ambiente esterno  $I(X:E)$ , l'informazione che X ha di E, e  $H(X|E)$  l'entropia condizionata di X dato E si ha:

$$I(X:E) = H_{\max} - H(X|E) = L - H(X|E)$$

E' questa che chiamiamo complessità biologica C(X); essa è ben differente dalla complessità algoritmica L. Si confrontino le due curve di probabilità al



fondo di fig. 5!

4.3 *La selezione naturale aumenta la complessità.* Si dice che l'evoluzione darwiniana aumenta la fitness di una popolazione, ma questo è un dato difficile da misurare; sembra più proprio dire che l'evoluzione aumenta l'informazione che una popolazione ha sulla sua nicchia, cioè  $C1$ . La formula precedente dice che l'informazione si rivela, in un insieme di sequenze adattate, come quei simboli che sono conservati (fissati) sotto mutazioni. Supponiamo che una mutazione vantaggiosa abbia luogo: se il vantaggio che essa induce è sufficiente a fissare la mutazione,  $C1$  ne è accresciuta; invece una mutazione deleteria non viene conservata.

Dunque la selezione naturale opera come un filtro che fa fluire l'informazione dentro il genoma, ma impedisce che ne scappi.

### 5. *Einstein senza relatività – contributo alla complessità*

Collocando la produzione di Einstein a partire dal 1905 nel confronto culturale fra le scienze fisiche e le scienze umane, mentre i due edifici della relatività speciale e generale rappresentano il coronamento del primo programma, iniziato con Galileo e Newton, le due rivoluzioni concettuali, che indicheremo con Q (quantistica) e CLR (correlazioni a lungo raggio) entrambe frutto della creatività di Einstein, finiscono col sanare il dissidio fra le due scienze (il cosiddetto gap fra le due culture) ponendo le premesse per una sintesi che rappresenta il programma della ricerca nel XXI secolo.

La fig. 6 mostra come lo Einstein relativistico si collochi nel filone post-newtoniano, completi cioè il programma a) di fig. 1. Invece lo Einstein dei sette lavori elencati in fig. 7 apre le porte alle due rivoluzioni: Q e CLR; preparando gli strumenti per una sintesi che coinvolge essenzialmente l'idea di complessità semantica.



Fig. 6

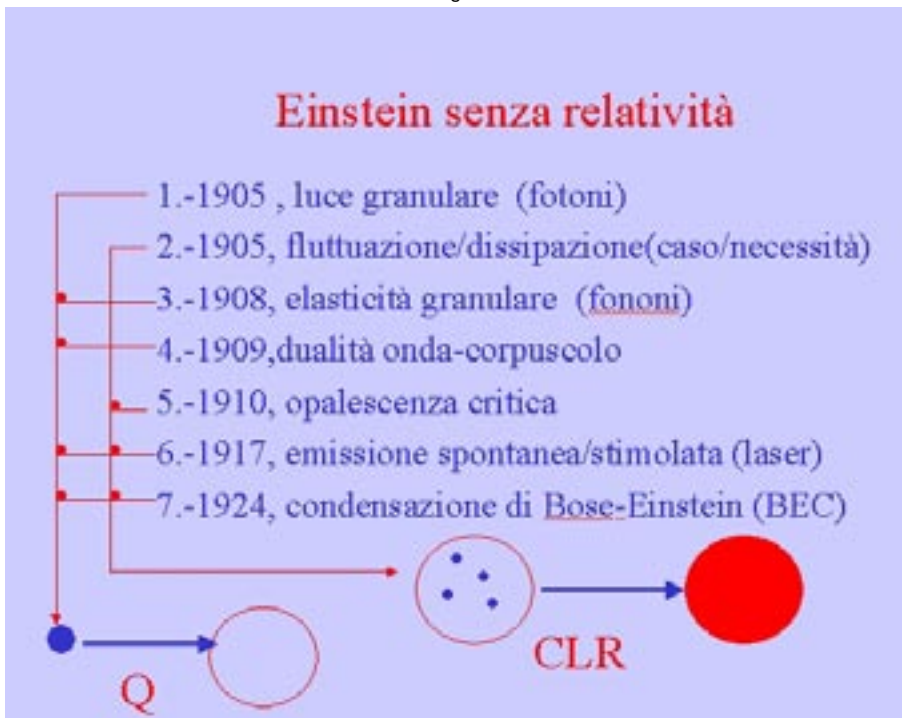


Fig. 7

### 6. Q come de-localizzazione dei termini nello spazio semantico

Precisamente, con Q il termine scientifico perde univocità e si distribuisce su un ambito di valori, come indicato in basso in fig. 7. Di ciò non ci rendiamo conto nella visione *diretta* di oggetti che siano più grandi della minima lunghezza d'onda a cui è sensibile la nostra retina. In tal caso (fig. 8) costruiamo sulla



retina dei tagli bi-dimensionali (2D) del segnale ottico e da una collezione di sezioni 2D costruiamo mentalmente il senso 3D del mondo. Invece nella visione *indiretta*, non potendo utilizzare la banda luminosa perché l'oggetto è troppo piccolo, ricorriamo a fasci di proiettili sonda (raggi X, elettroni, neutroni, ecc); in tal caso l'informazione consiste nelle posizioni spaziali dei proiettili sparpagliati dall'oggetto e raccolti su uno schermo. Questo è il famoso microscopio di Heisenberg: quanto più vorremo localizzare l'oggetto con proiettili penetranti tanto più ne disturberemo la velocità, sì che il prodotto delle due incertezze (indicate in fig. 8 con la lettera greca delta) manterrà un valore costante. Come mostrato in fig. 9, la probabilità di localizzare con precisione posizione e velocità di una particella non è il picco stretto assunto nella dinamica newtoniana come condizione iniziale per valutare l'evoluzione della particella; si ha piuttosto una campana di probabilità, e se cerchiamo di schiacciarla in una direzione si allunga nell'altra, in modo da mantenere costante l'area di incertezza sul piano posizione-velocità.



Fig. 8



Peraltro, questa impossibilità di localizzare con esattezza due quantità mutuamente incompatibili ci è già nota nella scrittura musicale (fig. 10): quanto più una nota è breve (localizzata nel tempo) tanto più ampia è la sua incertezza in frequenza (altezza definita solo in media).

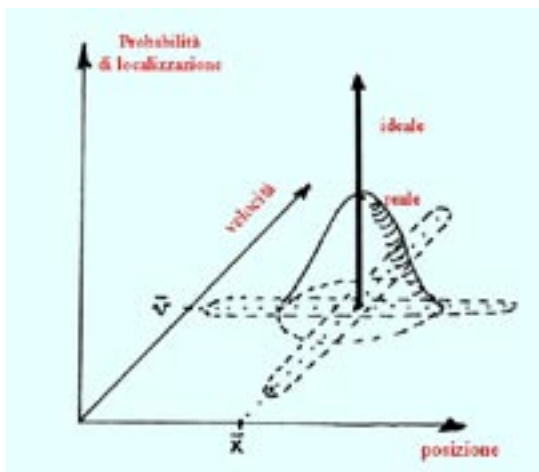


Fig. 9



Fig. 10

### 7. CLR come confluenza dei vari significati in uno privilegiato

La nascita di correlazioni a lungo raggio (CLR) in un sistema che prima sembrava costituito di oggetti indipendenti è stata introdotta da Einstein in tre situazioni fisiche peraltro del tutto distinte e ha dato luogo a tre lavori su



opalescenza critica (1910), emissione stimolata come base del laser (1917), condensazione di Bose –Einstein (1924).

La CLR è stata indicata in basso a fig. 7 come la confluenza dei vari punti separati (che nella simbologia di fig. 2 indicano i vari significati di una parola polisemica) su un valore comune.

Faremo uso di questa proprietà CLR per spiegare la confluenza dei neuroni su un significato percettivo unico (*feature binding*, in Sez. 9) e la confluenza dei vari significati su uno privilegiato nei processi cognitivi (Sez. 10).

La fig. 11 descrive il lavoro del 1905 sul moto browniano: se abbiamo un oggetto (palla blu) immerso in un bagno di molecole mutuamente scorrelate (palline rosse), l'unica cosa che le molecole avranno in comune sarà la temperatura del termostato in cui sono immerse e pertanto urteranno l'oggetto mediamente con lo stesso impulso. Se l'oggetto è calato nel bagno con una velocità iniziale (indicata da un freccia orizzontale spessa a destra) allora gli urti sul davanti sono più efficaci (trasferiscono più impulso) che gli urti dal didietro, come sa chiunque giochi al biliardo; dunque l'oggetto sarà frenato (dissipazione) e la sua velocità iniziale si attenua. Quando "in media" si è azzerata, rimangono delle fluttuazioni dovute agli urti ugualmente distribuiti su tutti i lati (a sinistra) e misureremo una fluttuazione residua attorno alla velocità media nulla. Orbene il rapporto fra fluttuazione e dissipazione ci dà informazione sulla temperatura del bagno.

Nel lavoro n. 5 del 1910 su *opalescenza critica* Einstein tiene conto delle deboli interazioni fra le molecole di un fluido (fig. 12 in basso, freccia rossa). In condizioni normali, queste interazioni sono mascherate dall'agitazione termica, le molecole sembrano indipendenti una dall'altra, come nel moto browniano. Se inviamo fasci di luce su una cella riempita con tali molecole (figura a sinistra) la luce *intrude* fra una molecola e l'altra, e la cella è trasparente. Ma se ora aggiustiamo con accuratezza la temperatura vicino al valore critico per cui l'agitazione termica uguaglia l'interazione molecolare, allora ogni molecola è virtualmente distribuita su un volume molto maggiore di quello che essa occupava inizialmente (cerchi rossi a sinistra) e la luce sarà riflessa da questi contorni del dominio di pertinenza di ciascuna molecola (avremo cioè CLR) e perciò sarà sparpagliata un po' in tutte le direzioni, come farebbe una nebbia densa: chiamiamo questo fenomeno opalescenza critica.





Se però abbassiamo ulteriormente la temperatura, il gas condensa in un liquido ad alta densità, le molecole saranno impaccate ciascuna attorno alla propria posizione e la cella sarà di nuovo trasparente. Dunque la CLR e l'opalescenza critica caratterizzano l'insorgere di notevoli interazioni mutue per cui non possiamo considerare più ogni molecola per conto proprio.

In modo concettualmente analogo, nell'emissione di luce i fotoni generati sono indipendenti se prevale l'emissione spontanea, ma per effetto dell'emissione stimolata (lavoro n. 6 del 1917) si correlano fra loro con CLR: è questa la base del laser inventato qualche decennio dopo.

Nel caso di una cella di atomi praticamente non interagenti (a differenza delle molecole dell'opalescenza critica!) c'è un margine di influenza attorno ad ogni atomo assegnato dalla meccanica quantistica e misurato dalla lunghezza di De Broglie. Questa cresce al diminuire della velocità, se raffreddiamo il gas a temperature al di sotto del milionesimo di grado Kelvin, allora la lunghezza di De Broglie supera la distanza media fra due atomi, e emergono delle correlazioni quantistiche che rendono tutti gli atomi della cella indistinguibili uno dall'altro: è insorta una CLR con vistosi effetti (condensazione di Bose-Einstein).

### *8. Complessità come apertura verso l'ambiente: noise o gerarchia di interazioni?*

Abbiamo visto che in un universo chiuso, dove tutti gli oggetti sono già assegnati, non si ha complessità ma complicazione, nel senso che:

- ogni problema è puramente sintattico, cioè implica la scelta e connessione di simboli già fissati;

- le risorse necessarie per risolvere il problema possono crescere in modo patologico con il numero di dati del problema.

Se invece siamo aperti all'irruzione di elementi nuovi, non preventivati nel costruire un repertorio cognitivo, non possiamo ovviamente pretendere da demiurghi di conoscere il nostro mondo e l'altro (che d'ora in poi chiameremo l'ambiente), ma dobbiamo limitarci a registrare quali modifiche l'interazione con l'ambiente induca nel nostro mondo.



Il primo approccio, che possiamo chiamare statistico, consiste nel ritenere l'ambiente come un disturbo (*noise*) su cui siamo ignoranti; esprimeremo questa nostra ignoranza prendendolo a massima entropia, cioè all'equilibrio termico, e caratterizzandolo con una temperatura. All'interno del nostro sistema (quello su cui possiamo dare misure) l'accoppiamento con l'ambiente a una certa temperatura (che diremo bagno termico) provoca due conseguenze:

- *dissipazione*, cioè uno smorzamento della velocità iniziale;
- *fluttuazione*, cioè oscillazioni permanenti a media nulla attorno al punto raggiunto di velocità nulla.

Nel lavoro del 1905, sul moto browniano, Einstein dimostrò come il rapporto fra fluttuazione e dissipazione sia proporzionale alla temperatura del termostato (fig. 11).

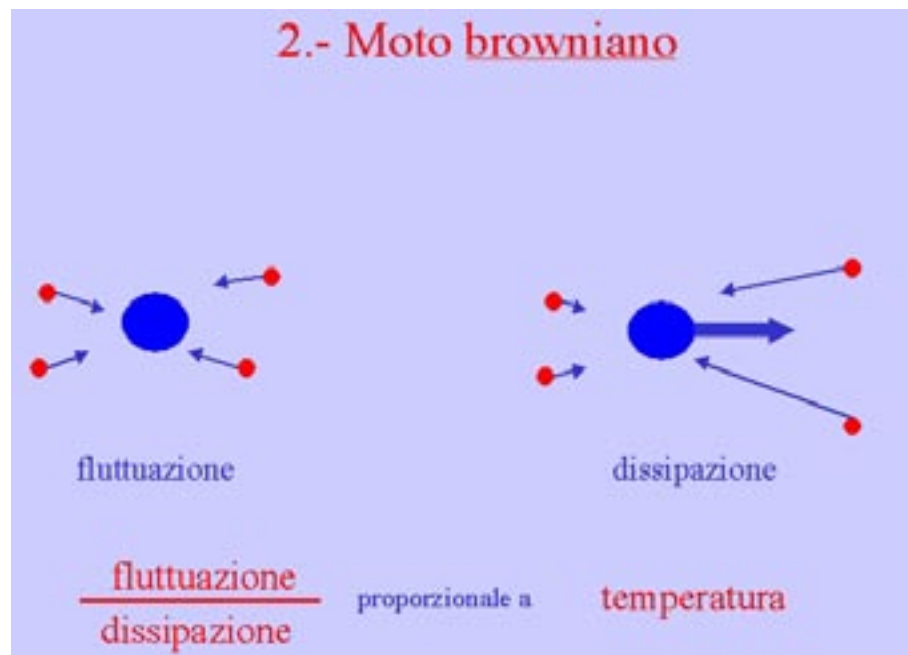


Fig. 11

Su questa falsariga si è costituita una strategia di Intelligenza Artificiale che possiamo chiamare la *oracle machine*: se aggiungiamo a una macchina



di Turing un noise, ciò permette di fuoriuscire dal limite di Gödel-Turing; questo trucco di sporcare un calcolo deterministico con un disturbo permette di esplorare situazioni altrimenti non accessibili ed ha diversi nomi (metodi Montecarlo, macchine di Boltzmann).

Il secondo approccio consiste nel riconoscere la struttura ricca dell'ambiente e nel porci il problema semantico: possiamo dire cose significative del mondo esterno attraverso le nostre acquisizioni percettive e cognitive? E' questo il problema cruciale della ricerca nel XXI secolo e vediamo come ci aiutano le due rivoluzioni einsteiniane.

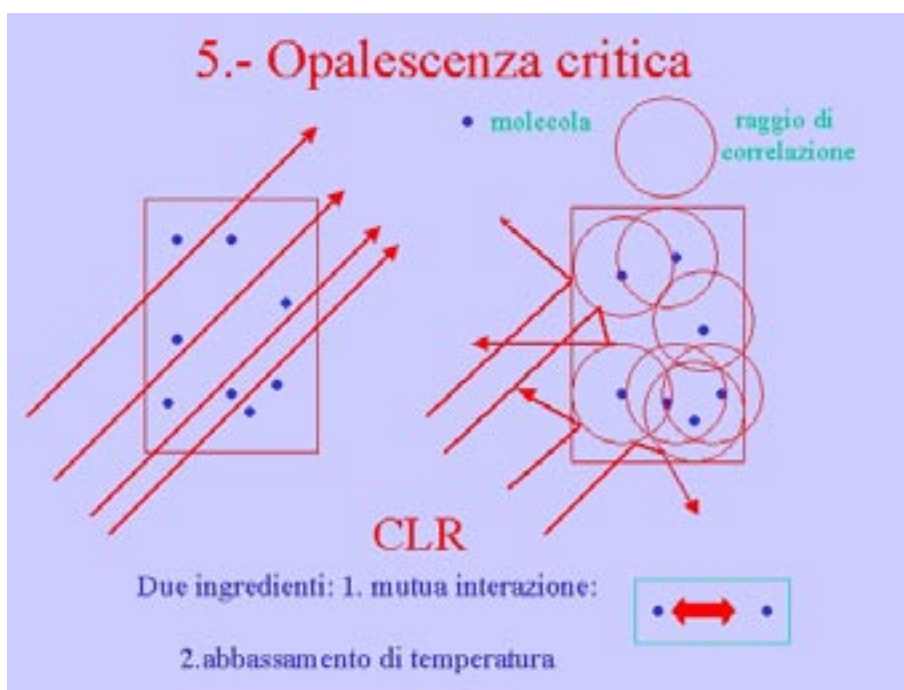


Fig. 12

*9. Feature binding nella percezione:  
come Q e CLR siano cruciali per i nostri processi cognitivi*

Premetto qualche informazione sui processi sensoriali. Nel caso della visione, abbiamo un milione di fibre che collegano la parte posteriore della



retina alla corteccia visiva e ogni fibra ha un campo recettivo angolare di circa 3,5 gradi; quindi una figura estesa – percepita come un continuum – è in effetti dissezionata su molti canali. Una percezione olistica emerge combinando gli stimoli separati che afferiscono a diversi campi recettivi attraverso una sincronizzazione dei treni di impulsi che caratterizzano i neuroni corrispondenti. Questi impulsi neurali sono variazioni rapide del potenziale elettrico attraverso la membrana cellulare e si propagano dal corpo del neurone (soma) alle sinapsi attraverso gli assoni che sono come linee di trasmissione. Alla sinapsi avviene il collegamento con un altro neurone. La comunicazione neurale è basata su un codice per cui aree corticali diverse che devono contribuire alla stessa percezione sincronizzano i propri impulsi. L'emissione di impulsi da un sistema dinamico non lineare è un accordo fra stimoli *bottom-up* dai trasduttori e riaggiustamento delle soglie pilotato.

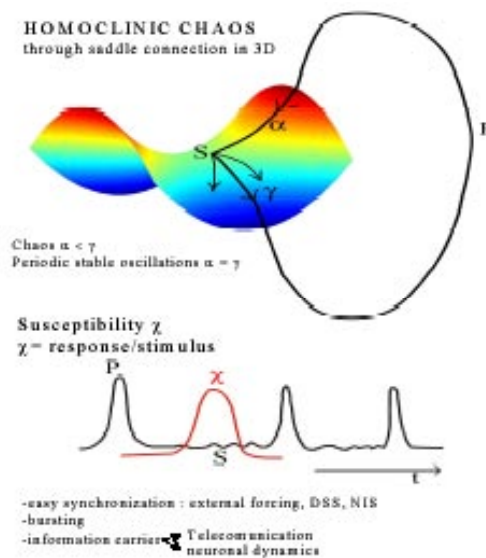


Fig. 13

Ricapitolo i punti salienti del processo integrandoli con l'esperienza da me sviluppata sulla sincronizzazione di sistemi caotici omoclinici:

- 1) Un singolo impulso, o spike, corrisponde a una traiettoria caotica attorno a un punto di sella; si entra dalla direzione stabile e si fuoriesce dalla direzione instabile (fig. 13); la traiettoria lascia la sella e ritorna ad



essa.

2) Un treno di impulsi corrisponde al ritorno sequenziale al punto di sella. Un parametro di controllo può essere fissato a un valore per cui l'intervallo di ritorno sia erratico (intervallo inter spike, ISI, caotico).

3) Attorno al punto di sella, il sistema ha una grande suscettibilità, cioè un piccolo disturbo è sufficiente a indurre una grande modifica; pertanto un treno di impulsi omoclinici può essere sincronizzato da una sequenza periodica di piccoli disturbi.

4) Le considerazioni precedenti giustificano la sincronizzazione mutua come il modo più conveniente che permette a neuroni diversi di rispondere coerentemente allo stesso stimolo, organizzandosi in una trama spazialmente estesa.

Il meccanismo dei singoli neuroni come rivelatori di caratteristiche elementari (ad esempio barre verticali od orizzontali, un particolare contrasto luminoso) è stato studiato in dettaglio; tuttavia restava pendente il problema: come fanno rivelatori elementari a contribuire a una percezione globale (cosiddetta Gestalt)? Una spiegazione è data in fig.14. Sia la donna sia il gatto sono costituiti dagli stessi elementi visivi, barre orizzontali e verticali, differenti gradi di luminanza e così via; ma quali sono i correlati neurali della identificazione di oggetti individuali? Ogni campo recettivo isola uno specifico dettaglio dell'oggetto, pertanto noi spezziamo un'immagine in un mosaico di campi recettivi adiacenti, come indicato nella figura con cerchi bianchi per la donna e cerchi neri per il gatto. Ora l'ipotesi di "feature binding" (legame di configurazione) consiste nell'assumere che tutti i neuroni nei cui campi recettivi ricadono parti di un oggetto specifico (sia la donna sia il gatto) sincronizzano gli impulsi come mostrato sulla destra della figura: qui ogni barretta verticale corrisponde a un singolo impulso di durata un millisecondo, e ci sono due treni distinti per i due oggetti. L'evidenza diretta di questa sincronizzazione è ottenuta inserendo microelettrodi in grado di sentire il singolo neurone nel tessuto corticale di animali. Un microelettrodo su un neurone ne misura l'attività elettrica, fatta di sequenze di impulsi di breve durata (1millisec) rappresentati come barrette verticali.

Evidenza indiretta di sincronizzazione è stata raggiunta anche per gli esseri



umani, elaborando i dati EEG (elettroencefalografici) .

Dunque, siamo in presenza di CLR = *correlazioni temporali*: neuroni che vedono lo stesso oggetto danno sequenze di impulsi in *sincronia*, mentre non ci sono relazioni temporali fra neuroni che si riferiscono ad oggetti diversi.

*Codice temporale* (CT) più sofisticato della semplice *posizione dell'ago* (PA) di uno strumento di misura. CT permette una ricchezza enorme di informazione; per esempio, 60 finestre temporali 0/1 (c'è/non c'è impulso) su un intervallo totale di misura danno  $2^{60}=10^{20}$  possibilità diverse (messaggi). Invece in PA l'ago dello strumento darebbe solo 60 possibili messaggi.

Possiamo ora capire come avvengano questi fatti neurodinamici. In fig. 15 la nuvoletta centrale rappresenta gli stadi corticali alti dove ha luogo la sincronizzazione. Vi sono due tipi di stimolo. Uno (*bottom-up*) viene dai rivelatori di caratteri elementari (stadi preliminari della visione; questo stimolo di per se è insufficiente perché provvede indifferentemente lo stesso segnale per es. per barre orizzontali che provengano sia dalla donna sia dal gatto); la perturbazione consiste in segnali *top-down* corrispondenti a congetture interpretative formulate dalla memoria semantica.

In altre parole la percezione non è l'impressione passiva di una pellicola fotografica, ma un processo attivo in cui gli stimoli esterni sono interpretati in termini di memorie passate. Un meccanismo di attenzione focale assicura che sia raggiunta una armonizzazione fra bottom-up e top-down; esso è stata chiamato ART (*adaptive resonance theory*) da Grossberg. Se l'armonizzazione non avviene si tenta con altre memorie finché essa venga raggiunta; in presenza di un'immagine completamente nuova allora il cervello accetta il fatto che è esposto a una esperienza nuova, senza precedenti.

Si noti il vantaggio di questo uso limitato nel tempo dei neuroni, i quali sono poi disponibili per ulteriori percezioni, in confronto al paradigma computazionale di elementi fissi di memoria che immagazzinano un oggetto specifico (la cosiddetta ipotesi del "neurone della nonna").



Fig. 14



Fig. 15



### *10. Dinamica cognitiva: la realtà è costruita o ci si adatta a essa? Verso una sintesi fra le due scienze*

Punto cruciale: uno schema adattivo, con feedback, attinge a un repertorio pre-costituito (auto-poiesi) oppure si arricchisce di novità? Risposta: lo spazio semantico non è precostituito ma si rinnova ad ogni esperienza.

Il gioco fra *bottom-up* e *top-down* fa sì che a pari stimolo esterno non corrisponda la stessa sequenza di spikes; questa pertanto non è come il codice a barre dei prodotti al negozio, dato a priori; e non ci sarà un futuro “grande inquisitore”, cioè un *chip* impiantato nel cervello che possa leggere nel nostro privato. Per lo meno: ciò vale per l’odorato del coniglio (W. Freeman), ma non vale per l’odorato della locusta (G. Laurent) la quale, come un robot, ha un repertorio di risposte inalterato nel tempo.

Se rappresentiamo i vari significati come punti di uno spazio semantico (fig. 16), per la locusta- come per un robot- parleremo di “circolo ermeneutico” cioè di connessione (linguistica o percettiva) fra elementi pre-assegnati e invariabili. Invece per un coniglio (e a fortiori per un essere umano) parleremo di “spirale ermeneutica” cioè di crescita cognitiva con l’esperienza.

Il fatto che la spirale sia innescata da stimoli significativi - quelli per intenderci che stimolano la rete di neuroni a organizzarsi in una CLR - dà un solido fondamento realistico al nostro rapporto col mondo (freccia verde inclinata in fig. 16).





Fig. 16

In fig. 16 indichiamo con una freccia orizzontale rossa le interazioni originali fra i vari significati di una parola, che sono legati al formarsi del lessico nell'ambito di una cultura. Per fare emergere queste interazioni e arrivare a una CLR come nell'opalescenza critica, abbiamo due modi, in analogia con i fenomeni delle transizioni di fase in fisica, incluso l'effetto laser o la condensazione di Bose-Einstein: e cioè o abbassiamo il disturbo termico (freccia verde orizzontale di fig. 16) in modo che fra i vari significati si svelino quelle parentele mascherate da un eccesso di disturbo esterno; oppure il soggetto cognitivo è pilotato (illuminato) da un forte stimolo esterno (freccia inclinata in fig. 16) che riorienta tutti i vari significati facendoli confluire in quello più adeguato a "capire" lo stimolo.

Nel primo caso, siamo in presenza di quello sforzo ascetico tipico di tutte le tecniche di meditazione, di liberarsi dai disturbi esterni; il rischio è che, concentrandosi su se stessi, si passino in rassegna solo i contenuti di memoria già acquisiti: è la metafora della *Biblioteca di Babele* di J. L. Borges.

Nel secondo caso, si valuta realisticamente la limitazione dei nostri contenuti e si accetta con docilità di integrarli con apporti a noi esterni; si è cioè *aperti* al mondo.



La fig. 17 mostra come questa strategia si sviluppi in un cammino cognitivo di tipo discorsivo. La fig. 18 oppone il circolo ermeneutico, corrispondente a una elaborazione di elementi già posseduti, alla spirale ermeneutica, in cui l'apertura al mondo permette di arricchire di connotazioni nuove la stessa parola rivisitata.



Fig. 17

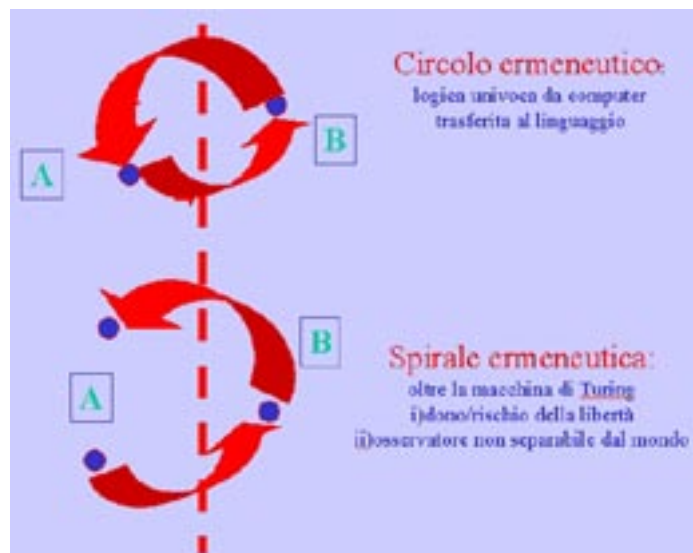


Fig. 18

La fig. 17 mostra come questa strategia si sviluppi in un cammino cognitivo



di tipo discorsivo. La fig. 18 oppone il circolo ermeneutico, corrispondente a una elaborazione di elementi già posseduti, alla spirale ermeneutica, in cui l'apertura al mondo permette di arricchire di connotazioni nuove la stessa parola rivisitata.

*Fortunato Tito Arecchi*