

RICERCHE

Riflessioni sull'esperienza cosciente. Le prospettive della teoria della informazione integrata

Mirko Di Bernardo^(a)

Ricevuto: 31 dicembre 2020; accettato: 5 settembre 2021

Riassunto Il presente contributo esamina il concetto di esperienza cosciente da una prospettiva epistemologica evuzionista, ispirata ad un approccio naturalistico non riduzionista. Il lavoro si inserisce nel quadro concettuale delle ricerche nel campo della filosofia della mente, avanzando delle ipotesi circa i possibili processi che hanno determinato la comparsa e lo sviluppo nella nostra biosfera di una mente specificamente umana sia dal punto di vista filogenetico che da quello ontogenetico. In quest'ottica, vengono rivisitati in chiave epigenetica alcuni tratti salienti della teoria della coscienza di Edelman alla luce delle più recenti ricerche sulla misurazione dell'esperienza cosciente, condotte da Tononi e da altri studiosi nell'ambito della *Integrated Information Theory* (IIT). In un quadro siffatto, l'articolo analizza alcune criticità dell'approccio algoritmico della IIT, evidenziando la necessità di individuare nuove misure della complessità (nuovi sistemi assiomatici) per quanto riguarda lo studio dei processi semantici di trasmissione dell'informazione biologica (intenzionale).

PAROLE CHIAVE: Coscienza; Evoluzione naturale; Neuroplasticità; Informazione intenzionale; Seconda natura

Abstract *Reflections on conscious experience. The perspectives of the integrated information theory* – This paper examines the concept of conscious experience from an evolutionary epistemological perspective, inspired by a non-reductionist naturalistic approach. Situated in the conceptual framework of philosophy of mind, it considers what processes could have led to the appearance and development of a specifically human mind in our biosphere, both from a phylogenetic and an ontogenetic point of view. Salient features of Edelman's theory of consciousness are revisited from an epigenetic perspective, in light of some of the most recent measurements of conscious experience proposed by Tononi and other scholars in the field of *Integrated Information Theory* (IIT). The paper analyzes some criticalities in the algorithmic approach of the IIT, highlighting the need to identify new measures of complexity (new axiomatic systems) for the study of semantic processes of transmission of biological (intentional) information.

KEYWORDS: Consciousness; Natural Evolution; Neuroplasticity; Intentional Information; Second Nature

^(a)Dipartimento di Biomedicina e Prevenzione, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", via Columbia, 1 - 00199 Roma (I)

E-mail: diber.mirko@gmail.com (✉)



1 Premessa

L'ORDINAMENTO DELLA NOSTRA BIOSFERA ha a che fare con la dinamica della vita che diviene sempre più complessa e che si auto-organizza man mano che si percorre la scala evolutiva, arrivando all'ultimo gradino occupato dalla capacità di auto-determinazione e dalla plasticità cerebrale umana.

L'indagine neuroscientifica si è ampliata moltissimo negli ultimi anni giungendo a indagare temi e problemi di natura meta-empirica in passato di esclusivo appannaggio delle investigazioni filosofiche come, per esempio, lo sviluppo del sé, la coscienza, l'emergenza del linguaggio e la accessibilità alla realtà da parte del soggetto conoscente. Tuttavia, la dinamica organizzativa delle informazioni provenienti e riguardanti il mondo esterno inizia a essere meno nebulosa: la qualità e le caratteristiche della auto-organizzazione biologica, infatti, rappresentano oggi, nel più ampio quadro post-neodarwiniano della teoria della evoluzione estesa, l'effetto dell'interazione fra il sistema e il suo ambiente.¹

Non è difficile riconoscere che una delle ragioni della pervasività dell'indagine neuroscientifica è data dal fatto che il tipo di sapere che essa prospetta ambisce a promuovere una rinnovata visione dell'essere umano. In tal senso, il presente contributo prende le mosse da una prospettiva epistemologica evolucionista, ispirata ad un approccio naturalistico e genealogico non riduzionista, nel tentativo di tracciare l'ipotesi dei possibili processi che hanno determinato la comparsa e lo sviluppo nella nostra biosfera di una mente specificatamente umana sia dal punto di vista filogenetico che da quello ontogenetico.

In quest'ottica vengono rivisitati alcuni tratti salienti della dottrina selezionista della seconda natura di Edelman alla luce di esperimenti di misurazione dell'esperienza cosciente che sono stati condotti da Tononi e da altri studiosi nel campo della *Integrated Information Theory*.² Per Edelman il cervello è complicato e sofisticato, ma non misterioso. Come altri organi è costituito da miliardi di cellule specializzate a condurre impulsi elettrici; possiede molte funzioni complesse, ma che in prospettiva popolazionale non pongono problemi insormontabili di intelligibilità.³ La coscienza è il più profondo di tutti i misteri scientifici: per alcuni non sappiamo nemmeno da dove cominciare, per altri è letteralmente a portata di mano.

[Con] un pugno ben assestato che sconquassi il cervello e la coscienza scompare del tutto. Una fiala di anestetico in vena e ciascuno di noi si spegne nel nulla – letteralmente cessiamo di esistere. E ogni sera, quando cadiamo addormentati di un sonno profondo, svaniscono improvvisamente spazio, tempo, pensieri, forme, colori, suoni, sentimenti ed emozioni – svanisce tutto,

noi stessi, il nostro mondo, l'universo intero. Per ritornare altrettanto improvvisamente quando sogniamo o quando ci svegliamo.⁴

La coscienza è considerata un termine non definibile in modo semplice in quanto non si può rappresentare ciò che sta alla radice di tutte le nostre raffigurazioni, ma, nonostante questa difficoltà, abbiamo tutti esperienza di essere coscienti.⁵

Nelle pagine che seguono vengono presi in esame sia alcuni concetti fondamentali della teoria della mente di Edelman (gruppi selettivi neuronali, mappature globali rientranti, seconda natura, approccio popolazionale) che la successiva teoria dell'informazione di Tononi per discutere l'ipotesi secondo cui da processi complessi immanenti si possa giungere a definire la funzione simbolica dell'esperienza cosciente secondo una prospettiva emergentista non riduzionistica (almeno in senso ontologico), dove diviene centrale il ruolo svolto dall'auto-organizzazione. In modo specifico, seguendo le linee di ricerca tracciate da Edelman e da Tononi, la tesi che sosteniamo è che la coscienza di ordine superiore si sia sviluppata come conseguenza di variazioni *epigenetiche* su di un substrato *già* in grado di realizzare una coscienza primaria e che l'esperienza auto-cosciente dipenda da un'organizzazione neurale interna sufficientemente stratificata da poter connettere l'attività delle aree cerebrali ai vari livelli della mappatura. Tuttavia, nella parte finale del contributo mettiamo in luce il fatto che il modello informazionale attualmente utilizzato da Tononi non sia ancora sufficientemente adeguato a descrivere gli aspetti semantici e selettivi "reali" dell'organizzazione biologica della coscienza.

A questo livello avanziamo la proposta di considerare, sebbene solo in astratto, le caratteristiche salienti di una specifica nozione di informazione intenzionale profondamente connessa al concetto di auto-organizzazione biologica e non riducibile (in senso sia ontologico che epistemico) a semplificazioni di natura procedurale o algoritmica di matrice computazionale.

2 Reintegrare la mente nella natura

La problematica legata all'origine e ai caratteri che fanno della coscienza ciò che è rappresenta una questione filosofica centrale che accompagna, seppure in modo implicito, molte ricerche di ambito neurobiologico; d'altronde senza fermarsi a riflettere sulle molte ricadute che si hanno sul piano clinico,⁶ questa rappresenta anche un terreno di scontro fra opposte concezioni del sapere neuroscientifico, relativamente al rapporto tra mente e cervello. Il terreno di studio è sconnesso e liberarsi dal dualismo cartesiano delle sostanze sembra una scelta allettante, così come risulta esserlo il ricorso a spiegazioni riduzioniste che teorizzano, pren-

dendo una scorciatoia, una identificazione del mentale con il neurologico o che attribuiscono ad aree cerebrali facoltà o attività⁷ che riguarderebbero l'individuo nella sua interezza. D'altra parte, quando si parla di coscienza, la difficoltà concettuale di operare un superamento del dualismo sostanzialistico diviene esasperante. Tuttavia, appare vieppiù allettante la possibilità di superare l'alternativa or ora accennata seguendo la terza via del monismo ontologico, magari ispirato a un approccio epistemologico di tipo pluralistico,⁸ oppure a un approccio sistemico, gerarchico e integrato in cui il concetto stesso di auto-organizzazione diviene fondamentale, favorendo altresì lo sviluppo di riflessioni teoriche alternative anche alla opzione del dualismo epistemico.⁹

A differenza dell'empirico, infatti, il piano di riflessione filosofico non può tralasciare la particolarità del rapporto fra parte e tutto presente nei processi di organizzazione interni agli organismi viventi: una singolarità che, tra gli altri, è stata evidenziata da Kant e, successivamente, ripresa da Hegel fino a Jonas a Edelman e a Varela.¹⁰

In quest'ottica, è proprio partendo da una prospettiva neurobiologica che si può pensare di procedere all'investigazione della coscienza come espressione dell'unitarietà psicofisica umana; ciò perché, nonostante questa possa sembrare una visione "parziale", non è soltanto una tra le tante prospettive d'indagine. Secondo Varela, per esempio, vita e cognizione sono profondamente connesse alla nozione di autopoiesi che comporta la sostituzione dell'idea classica di agente cognitivo centralizzato e unificato con il concetto di un sé disunificato. Pertanto, a livello dell'essere umano, l'enigma della coscienza si rende esplorabile proprio a partire dalla prospettiva neurobiologica, convenendo sul fatto che «il cervello non è un organo della coscienza» e che «la coscienza non è un segmento di circuiti cerebrali», bensì «un fenomeno eminentemente distribuito, che non risiede solo nella testa», senza per questo sottovalutare, o trascurare, il fatto che il «cervello da parte sua è essenziale perché contiene le condizioni di possibilità perché questo avvenga».¹¹

Compito delle neuroscienze è allora quello di reintegrare la mente nella natura, almeno secondo l'opinione del premio Nobel G. Edelman che reputa tale assunzione come necessaria per cogliere in pieno la specificità dei sistemi biologici dotati d'intenzionalità, rispetto ai sistemi che non lo sono.¹² Le indicazioni principali provenienti dai lavori di Edelman riguardano la peculiarità della materia cerebrale che fa da sostrato alla mente e lo statuto della coscienza. Nel complesso il «cervello è un esempio di sistema che si auto-organizza»,¹³ di modo che «in ogni momento la materia della mente interagisce con se stessa».¹⁴ Straordinaria è la dinamica organizzativa del sostrato materiale della mente, non l'insieme degli elementi chimici

che lo compongono. I neuroni, infatti, si contraddistinguono per la varietà delle loro forme, la loro funzionalità elettrica e chimica e, soprattutto, la loro connettività, cioè la loro capacità di istituire con le altre cellule nervose collegamenti, i quali, per numero e varietà, arrivano alla grandezza «dell'ordine di dieci seguito da milioni di zeri».¹⁵ Tuttavia, il dato che desta curiosità è che la maggior parte di queste connessioni si riferisce ai collegamenti fra le diverse aree cerebrali, non fra il cervello e il resto del corpo per cui «si può dire che il cervello sia in contatto con se stesso più che con qualsiasi altra cosa».¹⁶ In tal senso, l'abilità del cervello di rilevare, oltre agli stimoli provenienti dal mondo esterno, anche quelli derivati dalla sua stessa attività è un aspetto essenziale per capire l'origine della coscienza, intesa come fenomeno neurologico.¹⁷

Malgrado ciò, i termini usati per indicare la relazione fra la coscienza e l'attività neuronale sono refrattari a qualsiasi "riduzionismo sciocco":¹⁸ si parla di processi sottesi o richiesti o associati; si indicano i processi che alimentano l'esperienza cosciente o quelli che possono originarne le proprietà fondamentali e si fa ampio ricorso al concetto di emergenza.¹⁹ Nonostante Edelman assuma sul piano teorico una posizione nettamente alternativa all'approccio riduzionistico di tipo ontologico ed epistemologico, occorre precisare qui che le argomentazioni presentate nei suoi lavori di ricerca risultano comunque compatibili con il riduzionismo metodologico.²⁰

Per quanto riguarda invece il concetto di emergenza, in accordo con le definizioni divise da Stephan, potremmo dire di trovarci, nel caso di Edelman, dinanzi a una nozione forte di emergenza (sincronica), vale a dire, a una emergenza legata agli aspetti di novità, di imprevedibilità e di irriducibilità dell'evoluzione biologica, foriera di sempre nuove proprietà collettive incompressibili e non riconducibili alla somma delle parti che le costituiscono o, semplicemente, a livelli inferiori di descrizione. Tuttavia, nonostante tale posizione risulti del tutto incompatibile, sul piano concettuale, con il riduzionismo (in senso ontologico ed epistemologico), quando poi Tononi tenta di formalizzare tali occorrenze edelmaniane all'interno dei modelli matematici della teoria della mente integrata, a nostro avviso, finisce per aderire di fatto a una posizione emergentista più debole rispetto a quella proposta dal suo maestro, risultando compatibile con il riduzionismo epistemologico.²¹

All'interno della cornice concettuale disegnata da Edelman due sono i livelli coscienziali. Il primo di essi, legato alla coscienza primaria, implica una specifica tipologia di memoria e di organizzazione temporale. Essa è costituita dallo «stato di consapevolezza mentale delle cose del mondo, in cui si hanno immagini mentali del presente».²² La coscienza primaria consente di «mettere in relazione

i segnali che un individuo sta ricevendo con le sue azioni e con ciò che si è rivelato favorevole nel passato»,²³ basandosi su di un «piccolo intervallo di memoria»,²⁴ ma non si accompagna in nessun modo «alla sensazione di essere una persona con un passato e un futuro».²⁵ La coscienza primaria, che si fonda «sull'esperienza in atto»,²⁶ non riesce quindi a oltrepassare i limiti definiti da un «presente ricordato»,²⁷ che si esprime in base alla regolazione omeostatica. Questo non preclude a un animale la possibilità di una memoria a lungo termine, ma solo la consapevolezza della stessa e di conseguenza la possibilità di programmare un futuro che non sia prossimo.²⁸ La coscienza primaria, come la appella Edelman, rende disponibili le «strutture di servizio» che sono l'appoggio della coscienza di secondo livello, una tipologia coscienziale di ordine superiore, che rende possibile l'essere «coscienti di essere coscienti».²⁹ Tale riflessività prevede la presenza di un complesso di mezzi necessari. Prima di tutto, occorre contare su una forma di «rappresentazione concettuale di un sé vero e proprio (o sé sociale) che agisce su un ambiente e viceversa».³⁰ Tale rappresentazione presuppone la dotazione di una «memoria simbolica»,³¹ capace di dischiudere le dimensioni del passato e del futuro e di riportare le proprie azioni a un sé percepito come centro unitario.³² A sua volta, per andare oltre la semplice presenzialità (accedendo quindi anche alla dimensione linguistica) sono fondamentali «repertori cerebrali capaci di ritardare le loro risposte»,³³ di rimandare la risposta rispetto al momento dello stimolo.

Ora, l'assimilazione e l'impianto di relazioni significative nella memoria a lungo termine avvengono grazie all'interazione con gli altri individui della stessa specie. La dimensione intersoggettiva è essenziale per maturare la capacità di utilizzare dei mezzi simbolici che lavorano per confronto e per ricompensa nell'ambito della comunicazione sociale e dell'apprendimento.³⁴ Gli «scambi affettivi con altri individui» sono quindi necessari per permettere la costruzione della coscienza individuale, che è in grado di elaborare un senso del sé articolato nel tempo e di conseguenza di programmare il futuro in relazione alle reminiscenze del passato.³⁵ Il soggetto «si libera dalla schiavitù di uno schema temporale legato al momento o dagli eventi in corso che accadono in tempo reale e diviene capace di una vita interiore in cui si modellano il passato, il presente, il futuro, un sé e un mondo»,³⁶ grazie alla collaborazione tra le due tipologie mnemoniche, «l'una orientata al valore, sufficiente per regolare l'impulsività del presente, l'altra invece capace del simbolico, e di quel differimento temporale che consente la formazione di un modello del mondo».³⁷

Si verifica allora una rivoluzione ontologica, che fa sorgere un mondo vero e proprio. La coscienza di ordine superiore, infatti, «crea oggetti artificiali che sono mentali, portando così allo svi-

luppo di un dominio immaginativo fatto di sentimenti, di emozioni, di fantasia, del proprio sé e di volontà».³⁸

Secondo Edelman la coscienza di ordine superiore emerge come *exaptation* di strutture preesistenti: le aree impiegate nell'attività del nucleo dinamico avrebbero cioè sviluppato connessioni rientranti con la neo-corteccia, in particolare con le zone responsabili della categorizzazione simbolica e direttamente implicate nella produzione e nella comprensione del linguaggio. Il ripetersi del riferimento all'interno di mappature globali rientranti facilitò la memorizzazione di intere sequenze di eventi in cui il sé non figurava più semplicemente come sfondo, ma come *agente* privilegiato all'interno di un ricordo che fosse indipendente dal tempo. Lo sviluppo di particolari sistemi di memoria e la possibilità di riferirli attraverso il rientro all'attività dei centri simbolici contribuì poi alla comparsa di un vero e proprio *modello del sé astratto* su cui consolidare il concetto di «passato» e di «futuro».³⁹

Per Edelman, quindi, la comparsa della coscienza di ordine superiore dipese in gran parte da un'attività *epigenetica* che sulla pressione ambientale modificò una serie di apparati preesistenti collegandoli attraverso il rientro e avviando una crescita esponenziale della complessità processata. Una serie di cause ambientali agenti ai vari livelli dell'interazione organismo-nicchia favorì l'utilizzo delle risorse molecolari che furono ri-combinate in maniera innovativa, generando assoluta novità.⁴⁰ In questa prospettiva, dunque, acquista un preciso significato il ruolo svolto dalla evoluzione culturale nella variazione genetica, nella misura in cui l'ereditarietà coinvolge non solo il DNA, ma anche le informazioni (istruzioni epigenetiche) che ne regolano l'espressione.

Alcuni studi più recenti sul moscerino della frutta confermano le geniali intuizioni di Edelman, dimostrando che un marcatore del DNA viene trasmesso dai genitori ai figli divenendo essenziale per lo sviluppo dell'embrione.⁴¹ Ciò documenta che il DNA non è l'unica informazione biologica tramandata dai genitori ai figli: sono trasmesse alla prole, infatti, anche le istruzioni epigenetiche che all'interno delle cellule regolano l'espressione dei geni senza che venga alterata la sequenza del DNA.⁴² Ciò sta a significare che la memoria epigenetica è essenziale per lo sviluppo e per la sopravvivenza delle nuove generazioni in quanto ciò che apprendiamo e conosciamo incide in termini ontogenetici sulla crescita di ciò che siamo. Nella riproduzione, dunque, l'informazione epigenetica non è semplicemente ereditata da una generazione all'altra, bensì esercita un ruolo decisivo nel processo di sviluppo dello stesso embrione, un processo, vale a dire, che induce a rivedere le prospettive classiche presentate, per esempio, da Thompson e dai teorici neodarwiniani, dell'identità e della cre-

scita biologica, facendo emergere una configurazione estremamente più plastica del vivente, spingendo all'elaborazione di una nuova riflessione ontologica sui processi dinamici propri della dimensione creativa dello stato vivente della materia.⁴³

Un uovo fecondato non è quindi soltanto un veicolo di trasmissione genica, ma esso stesso luogo di espressione dell'informazione codificata e luogo entro cui il potenziale ricombinatorio delle sequenze nucleotidiche viene dotato di significato, perché posto in condizioni di esprimersi sotto forma di neotrascritti e proteine. In altre parole, l'uovo funge da contesto nel quale il messaggio genico può diventare significativo in quanto incarna una creatività espressiva infinitaria. A questo livello, la forma non è più semplice ordinamento o struttura, bensì può essere a ragione definita come "dinamica processualità di crescita", trascendendo così strutturalismo e funzionalismo.⁴⁴

In quest'ottica, in accordo con Edelman, con l'arrivo della coscienza di ordine superiore, legata al sorgere del simbolico e allo svincolo degli stimoli dal tempo, si è presentata all'essere umano «la possibilità di modificare i valori a livello biologico».⁴⁵ Questa possibilità comporta, non solo una trasformazione degli stimoli secondo nuove regole, ma anche e soprattutto la possibilità di poter arrivare a negare, dando ascolto alle proprie convinzioni profonde, "tutti gli imperativi biologici", come testimoniato per esempio da santi e martiri, che arrivano a negare in misura pressoché totale i valori della biologia e i suoi dettami.⁴⁶

Secondo l'impostazione teorica di Edelman, quindi, l'avvento della coscienza di ordine superiore è ciò che rende attuabile mutare i comportamenti ricordando il passato e guardando al futuro.⁴⁷ Tale coscienza rivoluziona l'orizzonte della specie umana. Ciò che essa dischiude, infatti, è un vero e proprio mondo, completamente diverso da quello degli organismi che non ne sono dotati. Ciò che rende diverso questo mondo è il fatto che in esso – da un lato – gli stimoli ambientali subiscono una trasformazione radicale in quanto vengono collocati in una dimensione simbolica e – dall'altro – che in tal modo si apre per l'uomo la possibilità di un altrimenti rispetto alla gamma dei suoi valori biologici. È come se, con l'emergere della coscienza di ordine superiore, si fosse realizzata – per l'uomo – una vera e propria rivoluzione nel concetto stesso di natura: dalla naturalità intesa come biologia alla naturalità come suo superamento.⁴⁸

3 Ontogenesi e filogenesi della coscienza

All'interno delle varietà di specie animali esistenti e l'uomo ci sono alcuni elementi di complessità crescente; il cervello, per esempio, si è evoluto e complessificato a partire da un sistema nervoso centrale scarsamente sofisticato, tipico di rettili, pesci e uccelli, per poi sviluppare un'area limbica

nei mammiferi e un'area prefrontale (presente anche nei primati); tuttavia, come noto, raggiunge il massimo grado delle sue potenzialità solo nella specie umana. L'uomo si adatta al proprio contesto e vive grazie agli strumenti messi a disposizione da queste tre aree possedendole tutte. Questo gli permette di instaurare relazioni di cooperazione finalizzate al conseguimento di obiettivi a complessità crescente. L'area prefrontale consente di ordinare e correlare le informazioni sintetizzando nuovi significati e valori, costruendo una visione del mondo, degli altri e di sé. Tale affermazione sottolinea il sodalizio fra predisposizioni innate e realtà ambientali in cui sono agite quelle predisposizioni.

In tal senso, i sistemi motivazionali sociali scattano conseguentemente a impulsi comunicativi sempre più articolati ricevuti dall'esterno, che presentano caratteristiche di simmetria o complementarità con i segnali prodotti da un altro soggetto. Negli animali dotati almeno di sistema limbico, chiameremo questi insiemi di regole sistemi motivazionali sociali che nell'uomo diventano interpersonali.⁴⁹ Questo insieme di regole orientate biologicamente organizzano il comportamento che porta alla sopravvivenza dell'individuo e della specie. In altri termini, sono sistemi che predispongono l'individuo all'azione e a comportamenti capaci di modificare il rapporto tra sé e l'ambiente fisico e relazionale

sono algoritmi per l'elaborazione della informazione ambientale in rapporto alla informazione corporea e, nel caso di quelli interpersonali, sono algoritmi per l'elaborazione della informazione sociale.⁵⁰

La funzionalità di questi sistemi è spiegata da Edelman tramite l'ipotesi dell'esistenza nel nostro cervello non di moduli specifici, che riguardano determinati sistemi, bensì di valori innati preposti a un migliore adattamento all'ambiente, che cambiano, venendo categorizzati sulla base della esperienza di relazione che compiamo dalla nascita in poi. Ciò vuol dire che non siamo dotati di forme predeterminate di comportamento sociale, ma solo di valori di adattamento innati.⁵¹ Succede spesso nel corso dell'esistenza, di escogitare nuovi *escamotage* per sopravvivere e riprodursi efficacemente. Tale capacità è data dal possesso di un cervello plastico, non caratterizzato da predeterminati circuiti neuronali, ma dotato di valori di adattamento che assicurano elasticità e di conseguenza capacità di fronteggiare contesti sempre mutevoli.⁵²

Questi sistemi accompagnano quelli promossi dal cervello rettiliano e sono innati e frutto dell'evoluzione.⁵³ I sistemi motivazionali si modellano solo attraverso l'interazione sociale e il loro operare attiva le esperienze emozionali. Ogni input in grado di attivare un sistema motivazionale interpersonale, infatti, corrisponde una relativa

esperienza emozionale. Quanto più gli animali sono complessi, tanto più i segnali risultano complessi e le emozioni risultano ricche e diversificate.⁵⁴ L'attivazione dei sistemi motivazionali interpersonali comporta, inoltre, una visione dell'altro veicolata dalle emozioni che vengono espresse durante l'interazione.⁵⁵

La coscienza primaria emerge nella dinamica rappresentazionale dell'altro, di sé e della relazione mediata dai sistemi motivazionali sociali. Il cervello, infatti, svolge il ruolo di catalogatore che, a partire da alcuni valori innati, classifica gli eventi in categorie.⁵⁶ La coscienza primaria è allora ancorata alla relazione fra sé e mondo, valori predeterminati e classificazione dell'esperienza. La coscienza, quindi, co-evolve con le relazioni sociali ed emerge come spazio di lavoro globale a cui affluiscono le operazioni di controllo ed elaborazione di distinti processi automatici, paralleli e specializzati.⁵⁷

Il sistema prefrontale umano è estremamente complesso ed è il terreno che permette relazioni sociali sempre più articolate. Dai primitivi segnali comunicativi tipici delle scimmie antropomorfe prende forma nell'essere umano il linguaggio vero e proprio, caratterizzato da sequenzialità e simbolismo, che mostra una correlazione tra la sua complessità e quella delle relazioni sociali. La coscienza di ordine superiore si presenta solo successivamente quando il linguaggio e la sua sequenzialità assumono la funzione di strumenti di pensiero. Questo livello di coscienza permette all'uomo di sperimentare continuità e temporalità, meta-cognizione e creazione di significati e valori nuovi. I due livelli di coscienza, compresenti nell'uomo, lavorano quindi insieme per garantire flessibilità e controllo.⁵⁸ L'evoluzione della coscienza umana è dipendente dal soddisfacimento di alcuni requisiti: l'abilità, fondata sul riconoscimento reciproco, di comunicazione sociale emotiva e non verbale; i neuroni specchio, che consentono di riprodurre attraverso azioni simulate interiormente, l'azione esplicita osservata nell'altro; la capacità di comprendere la natura delle relazioni fra due individui con i quali non si interagisce direttamente.⁵⁹ In sintesi, lo sviluppo del linguaggio e della coscienza trova la sua espressione più compiuta nella condivisione comunicativa.⁶⁰

La teoria della mente, in accordo con gli studi di Edelman e le più recenti ricerche di Tomasello, ci mostra come l'emergere della coscienza, anche a livello ontogenetico, sia un processo intersoggettivo, per cui con l'incontro della mente dell'altro, il bambino impara a conoscere sé e a riconoscersi come soggetto. Segnatamente, un bambino già dal primo anno di vita inizia a comprendere la mente dell'altro a partire da forme molto semplici di intenzionalità.⁶¹ Il processo biologico è quindi una condizione fondamentale, ma non sufficiente, per lo sviluppo della coscienza. L'evoluzione delle capacità cognitive dell'uomo poggiano sia filogeneti-

camente che ontogeneticamente sulla cognizione sociale. Il vertice evolutivo di queste competenze consiste nella comprensione della intenzionalità dell'altro nella coscienza come simile alla propria e condivisibile.

Le relazioni svolgono così una duplice funzione, prima ci mostrano chi siamo e il mondo, poi condizionano la coscienza nel qui e ora. I *pattern* di attaccamento si sviluppano mediante un processo epigenetico, le cui tappe precedenti condizionano, ma non definiscono quelle successive.⁶² Ogni relazione quindi racchiude in sé la potenzialità di un adattamento e ci restituisce una visione della mente come sistema complesso.⁶³

■ 4 Neuroplasticità: il cervello come interfaccia flessibile verso l'ambiente

L'abilità del cervello di ricevere e dare forma, in altre parole la sua plasticità, rappresenta uno degli schemi privilegiati di descrizione cerebrale da parte delle neuroscienze;⁶⁴ tale modalità rappresentazionale travalica la tradizionale e bergsoniana⁶⁵ concezione di un cervello come centrale organizzativa delle funzioni dell'organismo:

la plasticità funzionale del cervello distrugge la sua funzione di organo centrale e genera l'immagine di un processo fluido, presente dappertutto e in nessun luogo, che mette in contatto l'interno con l'esterno sviluppando un principio interno di cooperazione, di aiuto reciproco e di riparazione e un principio esterno di adattamento e di evoluzione.⁶⁶

La plasticità dello sviluppo neurologico, nell'embrione e nel bambino, di modulazione durante tutta la vita e di riparazione dopo un trauma, sottolinea, per esempio, i limiti di uno schema deterministico che non riflette con dovuta attenzione sull'evidenza della formazione delle connessioni neuronali, facendo derivare la loro genesi da un modello prestabilito e non riconosce il ruolo fondamentale dello spazio nel processo di formazione del cervello, che, lungi dal rimanere un fattore estraneo alla genesi neuronale, ne è invece parte integrante. Molte ricerche hanno evidenziato il fatto che lo sviluppo del cervello deriva, in larga parte, dal contatto con gli stimoli del mondo esterno. Tuttavia, è nella nozione di modulazione che il concetto di plasticità acquista il suo significato più proprio. Come osservato da Edelman,

poiché gran parte dello sviluppo cerebrale è stocastico ed epigenetico [...], non esistono due cervelli identici, neanche nel caso di gemelli monozigoti. Pertanto, quando si analizzano la struttura e il funzionamento del cervello umano, occorre tenere conto della storia dettagliata, anzitutto nel corso dell'evoluzione e poi nel-

lo sviluppo cerebrale del singolo individuo.⁶⁷

Dunque, la plasticità di modulazione consente di affermare che esiste una storicità costitutiva del cervello, che dipende soltanto dall'esperienza dell'individuo, dalla sua vita e dalle sue interazioni con l'ambiente. La modifica delle connessioni sinaptiche a opera dell'esperienza è evidente in modo particolare nel processo di apprendimento. Il fatto che i neuroni abbiano memoria degli stimoli provenienti dall'esterno consente di affermare che, se dal punto di vista anatomico ciascun cervello può essere simile ad un altro, rispetto alla sua storia, esso si presenta come un'entità irripetibile. Un comportamento materno o una condizione stressante possono segnare epigeneticamente aree cerebrali fondamentali come ipotalamo, ippocampo, amigdala e corteccie prefrontali, con conseguenze tendenzialmente stabili nel corso dello sviluppo e, in alcuni casi, addirittura anche trasmissibili per via transgenerazionale fino ai nipoti.⁶⁸

In altre parole, la via molecolare che gli eventi esterni e interni seguono per modulare il cervello è di tipo epigenetico. I comportamenti, la dimensione culturale e psichica cambiano il cervello: inducono plasticità cerebrale.⁶⁹ La produzione di nuove cellule nervose non esaurisce il suo compito sostituendo quelle morte, ma interviene nella plasticità di modulazione, dilatando il concetto di plasticità fin quasi a intaccare quelli di stabilità e robustezza.⁷⁰

Lo sviluppo epigenetico e la darwiniana selezione neuronale⁷¹ sono l'effetto della struttura plastica del sistema nervoso e della sua organizzazione di natura connessionale. In questa prospettiva, in accordo con Edelman, insistere sulla nozione di modello, come se ci fosse uno stereotipo a cui rifarsi per elaborare una definizione dell'essenza umana, mostra la sua inadeguatezza proprio in considerazione della natura storica e plastica dei processi nervosi; per tali ragioni in ambito epistemologico diventa più appropriato dirigere la riflessione metodologica verso i concetti di schema o modulo aperto. Il concetto di modello ricorda l'auto-chiusura, ma il soggetto è instabile ed esposto alle oscillazioni di ciò che è altro da sé: non è determinato e determinabile entro un paradigma di autosufficienza e isolamento a conferma delle lungimiranti intuizioni fenomenologiche sul concetto di natura divise da Merleau-Ponty.⁷²

Per un approccio che superi il determinismo e il riduzionismo fisicalista è fondamentale accettare l'evidenza di un sistema nervoso capace di adattarsi all'ambiente modificando se stesso. Le neuroscienze, tuttavia, sono in grado di descrivere il senso sotteso a tali modifiche, indotte dal mondo e all'altro, o si limitano a indagare e descrivere i meccanismi che si verificano a livello recettoriale e biochimico?

Dato che l'individuo è la *summa* delle esperienze che sperimenta nel mondo, l'apparato neurona-

le con tutte le sue strutture e la sua complessità non può essere considerato da un punto di vista filosofico più del mezzo/supporto (referente) per cui tale esperienze avvengono.⁷³ In questo senso, in accordo alla neurobiologia della intersoggettività e alle più recenti analisi funzionali della neurodinamica, i processi intenzionali (emergenti in quanto trascendenti la mera dimensione estensionale del cervello) non appaiono a oggi integralmente riducibili ai correlati neurali localizzabili a livello delle mappe cerebrali, né associabili esclusivamente a procedure algoritmiche.⁷⁴ Tali considerazioni consentono di indirizzare la riflessione verso la necessità, sottolineata a più riprese da Edelman e Tononi, di individuare criteri formali e oggettivi per una adeguata intelligibilità dei flussi informativi alla base dell'esperienza cosciente.

5 Misurare quantità e qualità dell'esperienza cosciente

A partire dalla rivoluzione scientifica del diciassettesimo secolo, le scienze naturali si sono distinte per la loro capacità di leggere quantitativamente i fenomeni naturali e, in questo modo, si sono rese capaci di contestualizzarli all'interno di parametri che validassero, più che oggettivamente, intersoggettivamente le ipotesi dichiarate. Ispirandosi a questo principio delle scienze della natura, la *Integrated Information Theory*⁷⁵ (IIT) proposta dal neurobiologo Tononi, allievo di Edelman, mira a studiare quantitativamente la coscienza, rendendo possibile una sua misurazione anche quando l'attribuzione intersoggettiva può fallire.⁷⁶

La IIT trova numerosi riscontri in ambito clinico. Riuscire a misurare la coscienza comporterebbe la creazione di una unità di misura di riferimento utilizzabile in casi critici in cui gli individui sarebbero impossibilitati ad agire. Pertanto, grazie all'integrazione delle informazioni ottenibili da EEG e TMS sarà possibile valutare se un paziente è cosciente o meno, interpretando i risultati dei test con gli assunti teorici della IIT. L'*équipe* di Massimini sembra sia riuscita nell'intento, avendo stabilito il *Perturbational Complexity Index* in grado di misurare la capacità di un cervello di generare coscienza.⁷⁷ Questo indice è teoricamente fondato sulla IIT, dato che si propone di misurare la capacità di un cervello di diffondere il proprio segnale in modo altamente differenziato e integrato.

Nel dettaglio, attraverso la TMS si stimola il sistema cerebrale e in seguito si monitora la risposta attraverso l'EEG. Se il risultato è una risposta integrata e differenziata, allora il sistema è cosciente. Questo approccio rappresenta il livello più profondo, finora raggiunto, per indagare se una persona del tutto immobilizzata può essere considerata cosciente o meno. I pazienti diagnosticati come in uno stato vegetativo mancano di consapevolezza, mentre i pazienti diagnosticati come in uno stato di mi-

nima coscienza mantengono una consapevolezza fluttuante. Tuttavia, è una sfida diagnosticare con precisione questi disturbi con valutazioni cliniche del comportamento. Al fine di migliorare l'accuratezza diagnostica, sono stati sviluppati approcci basati sulle neuroimmagini per rilevare la presenza o l'assenza di consapevolezza nei pazienti che non hanno una risposta aperta. Per il piccolo sottogruppo di pazienti che mantengono la consapevolezza, le interfacce cervello-computer potrebbero servire come strumenti per la comunicazione e il controllo ambientale. Queste tecniche sono state in grado di rivelare consapevolezza e persino consentire una comunicazione rudimentale in alcuni pazienti che rimangono completamente non responsivi dal punto di vista comportamentale.⁷⁸

Le implicazioni di questi risultati si estendono ben oltre le scoperte cliniche e scientifiche immediate poiché sollevano nuove questioni antropologiche ed etiche (sul ritiro, per esempio, di nutrizione e idratazione), nonché forniscono innovative opzioni epistemologiche in merito agli aspetti multidimensionali degli stati globali di coscienza.⁷⁹ Ad ogni modo, i processi cerebrali che sottendono alla coscienza sembrano oggi collocabili nel sistema talamo-corticale, considerata la sua conformazione neuronale. Nonostante il numero dei neuroni sia superiore nel cervelletto, è nella corteccia cerebrale che si trovano le strutture atte allo sviluppo della coscienza a conferma del fatto che non è la quantità di neuroni, ma la loro attività funzionale, ciò che genera l'esperienza conscia. Secondo quanto evidenziato da Edelman, l'organizzazione neuronale nel cervelletto mostra la presenza di strutture indipendenti (moduli separati che impediscono l'integrazione dell'informazione), mentre nella corteccia le cellule nervose si organizzano in insiemi funzionali la cui totalità è superiore alla somma delle singole parti che formano il sistema.⁸⁰ La IIT sostiene che la coscienza consista nella capacità posseduta da un sistema di integrare informazione. Tale capacità richiede che il sistema possenga due requisiti fondamentali:

essere dotati di un vasto repertorio di possibili stati interni e possedere una struttura altamente integrata che determini la dipendenza causale dello stato di ciascun elemento del sistema in funzione dello stato degli altri elementi.⁸¹

Ogni stato cosciente che si verifica esclude necessariamente il verificarsi degli altri possibili stati del sistema stesso. Quest'impostazione si basa sulla teoria matematica dell'informazione di Shannon e Weaver, che definisce l'informazione in relazione all'entropia di un sistema e l'informazione stessa viene descritta come misura della riduzione dell'incertezza.⁸² Su questa impostazione la IIT si prefigge di misurare, attraverso un approccio matematico, la mole di informazione integrata gene-

rata da un sistema. La coscienza di un sistema viene definita come «la quantità minima di informazione "effettiva" integrata attraverso la connessione più debole fra due partizioni arbitrarie del sistema stesso» e la funzione matematica che designa questa quantità viene simboleggiata con Φ (*phi*). Secondo la IIT il valore di *phi* deve essere continuo e il superamento di questo valore soglia da parte di qualsiasi sistema comporta la capacità di esperienze coscienti.⁸³

Ogni esperienza cosciente è caratterizzata dalle seguenti cinque proprietà rivisitate nel contesto neurobiologico, ma derivanti dal mondo della fenomenologia: esistenza, composizione, informazione, integrazione ed esclusione. Tononi trasforma questi assunti in postulati, partendo dal presupposto che fenomeni prettamente soggettivi della coscienza possano trovare un riscontro funzionale all'interno dell'organizzazione cerebrale.⁸⁴ Essendo stata formalizzata, la teoria IIT può essere applicata, in astratto, a ogni sistema fisico: sia esso un oggetto, come il cervello di un uomo o di un altro animale, frutto dell'evoluzione per selezione naturale, sia a un computer o a qualsivoglia circuito elettronico progettato da un ingegnere. Tuttavia, l'obiettivo primario del neurobiologo italiano consiste nel mostrare il fatto che la coscienza, da sempre considerata un mistero insondabile, sia in realtà la cosa più reale, più grande e più irriducibile che esista, ma non per questo non misurabile. Le sue forme sono geometriche, la sua misura un numero: *phi*.

L'esperienza esiste intrinsecamente (per il soggetto, non per un osservatore esterno); è strutturata (è composta di svariati contenuti e delle loro relazioni); informativa (ogni esperienza è specifica – quella che è, pertanto diversa da innumerevoli altre); integrata (una e irriducibile); definita (ha i contenuti che ha, nulla di meno e nulla di più).⁸⁵

A queste cinque caratteristiche corrispondono necessariamente, nella IIT, altrettanti requisiti dei substrati fisici della coscienza a cui essa dà una veste matematica, pervenendo a una formulazione precisa: «il substrato fisico della coscienza deve essere un massimo globale di potere causale intrinseco, compositivo, specifico e irriducibile».

Dunque, la teoria di Tononi è in antitesi con il riduzionismo: il *phi* è una misura di irriducibilità. Oltre la dimensione quantitativa appena ricordata, dell'esperienza cosciente viene discussa anche la qualità. La teoria di Tononi tenta di spiegare i "qualia" come «classi di relazioni informazionali generate all'interno del repertorio di stati possibili di un sistema integrato».⁸⁶ La quantità di stati verificabili di un sistema può essere descritto attraverso il modello dello «spazio dei qualia». In questo modello ogni punto del citato spazio definisce la probabilità di un determinato stato del sistema;

i vettori che collegano i vari punti descrivono invece le relazioni cariche di informazione tra gli elementi connessi. I qualia sono rappresentati come sotto-spazi dello spazio dei qualia che definiscono univocamente ogni esperienza.⁸⁷

L'impostazione della IIT è considerata "*phenomenology first*". In altre parole, questo modello teorico non pone come punto di partenza la domanda circa le caratteristiche che certi meccanismi a livello cerebrale debbano condividere per poter generare l'esperienza conscia; contrariamente, la teoria si pone per prima cosa la domanda sugli aspetti dell'esperienza cosciente e successivamente si interroga sull'impalcatura fisiologica che determina quegli aspetti. Nonostante la IIT sia fenomenologicamente orientata si pone come obiettivo la misurazione della coscienza. Questa impostazione potrebbe sembrare impraticabile perché sembra mettere in conflitto la prospettiva in prima persona con il bisogno di una descrizione in terza persona della coscienza. Tale conflittualità però è solo apparente: la necessità esplicativa è, infatti, epistemologica e dipende dal fatto che l'esperienza soggettiva è proprio ciò che una teoria della coscienza deve rendere chiara e, dunque, ciò da cui è necessario partire.

6 La IIT tra criticità e nuove prospettive

6.1 I limiti della teoria della coscienza globale

Un dato di fatto è che il principale punto di forza della IIT è la sua capacità di fornire una base teoreticamente forte a un indice in grado di distinguere quando un soggetto è cosciente o meno, indipendentemente dal dato comportamentale.

Il processo di integrazione della mente nella natura, obiettivo che le neuroscienze stanno perseguendo da tempo, passa necessariamente dalla capacità di descrivere numericamente il fenomeno-coscienza; in tal senso il lavoro della IIT offre un importante contributo metodologico al tentativo di risolvere il problema dell'applicabilità di qualsivoglia teoria scientifica a livello sperimentale anche se riferita a fenomeni aleatori, collettivi, emergenti e storici, ossia intrinsecamente irreversibili e naturalmente imprevedibili in modo compiuto.⁸⁸

Questa è la ragione per cui occorre trovare una procedura di misurazione della coscienza che sia verificabile, ossia computabile, nonostante il fenomeno studiato non risulti dal punto di vista fisico (termodinamica del non equilibrio) e da quello esistenziale (aspetti qualitativi emergenti specifici) riconducibile interamente a procedure algoritmiche.⁸⁹ A tal proposito, sorgono almeno due problemi: un primo strettamente matematico e un secondo legato all'aspetto dinamico interazionale della coscienza. Come già ricordato, *phi* è calcolata attraverso l'individuazione della partizione che porta la minor perdita d'informazione possibile. Seguendo questa strada, diviene necessario bi-

partizionare il sistema lungo ogni possibile partizione, così da trovare in che modo gli elementi del sistema sono effettivamente connessi tra loro. La nozione matematica di "*effective connectivity*" assicura la relazione che tra due elementi (in questo caso una coppia di neuroni) sia causale e non correlazionale, ma porta con sé il problema di complessità computazionale, come messo in evidenza da vari studiosi.⁹⁰ In aggiunta, un "coscienziometro" deve anche scontrarsi con la natura dinamica e interazionale della coscienza. A tale problema, la IIT tenta di rispondere attraverso la nozione di "*matching*"; tuttavia, quest'ultimo non è un concetto risolutivo perché sembra evidenziare "solo" che l'unico contesto in cui, a oggi, la coscienza è presente è quello biologico. Tononi e Koch, infatti, hanno recentemente sostenuto che gli attuali computer non superano la soglia minima del *perturbational complexity index* per un motivo strutturale: le componenti dei computer attuali non sono integrate. E, dunque, non rispondono ai criteri formali della teoria IIT.⁹¹ Di recente, sono stati ipotizzati e proposti diversi metodi di misurazione del dinamismo della coscienza, tutte le proposte in campo neuroscientifico dovranno essere verisimilmente integrate per cogliere le sfaccettature coscienziali.⁹²

La IIT, diversamente dai metodi citati, si pone come obiettivo quello di elaborare una teoria della coscienza globale che descriva le caratteristiche della coscienza in quanto tale. Sono state mosse due tipologie di critiche al raggiungimento di questo obiettivo. La prima è riassunta nella posizione di Seth e altri studiosi, che sostengono come

la coscienza sia un fenomeno biologico ricco, una soddisfacente teoria neurale della coscienza deve evitare eccessi riduzionistici. Il riduzionismo eccessivo può essere rivelato da reificazioni improprie, per esempio, rendendo un processo dinamico come entità statica [...] qualsiasi teoria che identifichi la coscienza con una misura singola si presta a essere eccessivamente riduzionista e, di conseguenza, limitata nelle sue finalità.⁹³

La seconda può essere ricondotta alle posizioni di Cerullo, secondo cui la IIT non rappresenta una teoria della coscienza, bensì

una teoria di un parziale panesperienzialismo, anche qualora fosse corretta, non ci aiuta a comprendere o predire il tipo di coscienza rilevante per la nostra esperienza soggettiva.⁹⁴

In ogni caso, come evidenziato dai recenti studi nel campo della neurofenomenologia,⁹⁵ l'analisi del cervello in termini puramente neurofisiologici, sebbene necessaria per descrivere la coscienza, non esaurisce tutti gli aspetti della esperienza cosciente

in quanto non va oltre l'analisi dei correlati dell'intenzionalità.

La nostra fenomenologia, dunque, se opportunamente rivisitata alla luce delle nuove prospettive neurobiologiche, può ancora offrire un prezioso contributo ai fini della individuazione degli aspetti più squisitamente intenzionali che una teoria della coscienza "realmente" integrata dovrebbe investigare. Invero, per mantenere profondamente integrate le analisi in prima e terza persona occorre pensare a una nuova teoria dell'informazione adeguata ai fenomeni biologici e cognitivi e in grado di cogliere gli aspetti semantici (intenzionali) dell'esperienza cosciente nei suoi processi di *embodiment*, ovvero di una incarnazione a livello innanzitutto biologico e neurale. Un *embodiment* che lega insieme, per esempio, il pensare al movimento di un corpo nello spazio e il vedere al definirsi di contorni di una neurogeometria a livello della corteccia visiva.⁹⁶

La mente dunque si presenta come un vero e proprio processo articolato distribuito e stratificato di auto-organizzazione spontanea, che ha come referenza le connessioni neurali. Nella misura in cui sono caratterizzati da processi di auto-organizzazione, i processi cognitivi risultano basati, pertanto, sulla graduale costruzione di un "soggetto-io" caratterizzato da un progressivo lavoro di astrazione, unificazione ed emergenza che conduce, da un lato, alla parziale creazione ed interpretazione della realtà esterna e, dall'altro, alla costituzione di quello stesso soggetto come soggetto cognitivo.⁹⁷

6.2 Prolegomeni per una teoria dell'informazione biologica

Occorre, in questo senso, andare oltre la caratterizzazione data da Shannon del concetto di informazione e quindi ripesare anche l'approccio computazionale del coscienzaometro di Massimini. La nostra capacità di arrivare a distinguere microstati atti a dar conto dell'articolarsi di una funzione-entropia associata a specifici vincoli regolatori a carattere biologico può permetterci di delineare una spiegazione, in generale, dei processi di soglia e di auto-organizzazione propri dei sistemi cognitivi. Bisogna, in altre parole, rendersi conto in primis che non è possibile calcolare l'informazione biologica così come avviene per il caso della trasmissione dei segnali.

Non possiamo confondere eventi macroscopici o macrostati con microstati. Né basta tener conto dell'intervento dell'attività della misura distinguendo informazione libera e informazione legata, quando, poi, non si è in grado di individuare la realtà intrinseca dei microstati biologici e, quindi, il tipo di vincoli specifici a essi connessi. È necessario, al contrario, individuare i livelli della informazione profonda,⁹⁸ là dove si nascondono i vincoli regolatori; è necessario, altresì, dar ragione del

rapporto che lega l'osservatore alla sorgente e in particolare del nesso che intercorre tra i vari livelli a cui si disloca il contenuto della informazione.⁹⁹ Ciò permetterà di definire in modo corretto i microstati con riferimento all'evoluzione reale della sorgente e all'apparizione progressiva di nuovi vincoli in presenza di un aumento della variabilità.

Nel quadro di questa apertura di carattere semantico, a nostro giudizio si profila l'importanza di possedere una teoria dell'informazione dei processi biologici che non si incentri soltanto sulla determinazione di particolari distribuzioni di probabilità, da un lato, e sull'accertamento delle condizioni di ergodicità, dall'altro, ma che, diversamente, definisca il contenuto di informazione di "strutture-oggetti" determinati in termini della complessità degli oggetti stessi, della quantità di informazione necessaria per calcolare e generare le strutture sotto esame. Ebbene, l'ordito concettuale fornito da Shannon non consente di analizzare i punti campioni oltre il livello di superficie. Essi vengono definiti, per di più, in relazione a una rete di vincoli a carattere markoviano che limita, a sua volta, le possibilità relazionali di tali punti, nonché il ventaglio di scelta a essi relativo.

Il contributo fondamentale di una teoria della informazione biologica alle problematiche fin qui affrontate, in accordo con Carsetti, consiste nel descrivere in termini del tutto generali il rapporto tra osservatore e osservato come un processo intenzionale adattivo e co-evolutivo in cui la capacità di costruire modelli del mondo appare come una ricerca di connessioni ad un grado sempre più ampio di apertura.¹⁰⁰ In questo contesto la IIT rappresenta un primo incoraggiante passo verso uno studio non riduzionistico (in senso ontologico) dell'informazione cosciente. L'analisi dei meccanismi di trasmissione dell'informazione necessaria, tuttavia, di ulteriori misure della complessità, misure (nuovi sistemi assiomatici), vale a dire, che non possono riguardare solo la rarità statistica (Shannon) o la incomprimibilità computazionale (Kolmogorov-Chaitin¹⁰¹). Esse dovrebbero, al contrario, anche essere in grado di tener conto della connessione accoppiata tra la sorgente e l'agente vivente (o cognitivo), l'evoluzione di questa connessione, nonché la costituzione successiva di veri e propri processi di riorganizzazione continua a livello semantico, oltre le procedure algoritmiche dei modelli computazionali che risultano compatibili con il riduzionismo epistemologico, come nel caso della teoria dell'informazione integrata.

Tononi e Massimini, come abbiamo visto, sviluppano un approccio dinamico alla computazione umana e considerano la possibilità di descrivere alcuni aspetti della computazione naturale (informazione integrata) in termini algoritmici, dando a volte l'impressione di assumere implicitamente l'idea che i processi cognitivi naturali operino realmente mediante procedure di tipo algoritmico.

Indicativa in tal senso è la quasi totale assenza di riferimenti ai risultati limitativi ottenuti da Gödel, Turing, Tarski e Church,¹⁰² nonché al ruolo centrale delle scelte osservative e al carattere non strettamente algoritmico dei rapporti tra livelli descrittivi, come rimarcato, per esempio, dalla teoria della *Hyperstructure* di Baas ed Emmeche¹⁰³ e dall'applicazione allo studio della cognizione delle teorie dei sistemi non lineari complessi, della termodinamica del non equilibrio e delle metodologie introdotte dalla neurodinamica funzionale e dalla semantica non standard.

In effetti, per risultare incompatibile con il riduzionismo (epistemologico oltre che ontologico) un'adeguata teoria della informazione intenzionale (o biologica) dovrebbe fare i conti, a nostro avviso, con il modello di Baas-Emmeche, che ammette due tipi di emergenza: una di natura computazionale, in cui è sempre possibile trovare una relazione formale e algoritmica tra il livello emergente e quello base, e l'emergenza osservativa, che non permette alcuna relazione deduttiva univoca in grado di realizzare questa connessione.¹⁰⁴

L'emergenza osservativa (o computazione non Turing) è dunque di natura radicale in quanto l'informazione necessaria per correlare le descrizioni del sistema non è disponibile esplicitamente in forma algoritmica (non può essere descritta tramite relazioni ricorsive), il che introduce una forma di apertura logico-informazionale nel cuore del processo modellistico: non soltanto misurazioni diverse forniscono una differente distribuzione, ma sono possibili più collegamenti e le varie configurazioni non sono tra loro algoritmicamente connesse.¹⁰⁵ Stando così le cose, a nostro giudizio l'esperienza cosciente appare come un fenomeno di transazione, ovvero la partecipazione unitaria e continua a una serie di trasferimenti bi-direzionali di informazione indipendenti tra loro tra popolazioni di neuroni nello stesso tempo interconnesse. Nelle popolazioni di neuroni la struttura di reciprocità che emerge spontaneamente è normalmente triadica e quindi aperta, una struttura in cui è possibile rintracciare chiaramente non solo fenomeni di associazione molecolare, bensì fenomeni di cooperazione in cui ogni parte, così come c'è soltanto mediante tutte le altre,

è anche pensata come esistente in vista delle altre e del tutto, cioè come strumento [...] solo allora e per ciò un tale prodotto potrà essere detto, in quanto essere organizzato e che si auto-organizza, uno scopo naturale.¹⁰⁶

Qui possiamo riconoscere con precisione quel particolare intreccio di auto-organizzazione, complessità, emergenza, assimilazione e intenzionalità che ci permette di "leggere" la vita e la coscienza come fenomeni cognitivi e coevolutivi. Alla luce di tutto ciò, dunque, abbiamo un'esperienza coscien-

te quando ci sono vita e significato: essa è progetto che non può farsi puro codice, ovvero non può mai risultare separabile dal suo supporto. Non vi è alcun "volo della coscienza" in questo processo, ma solo il profondo radicamento di ogni individualità nella naturalità del tempo che lo ha anticipato e dunque generato. È la selezione la chiave interpretativa dell'origine del significato, dal grado più basso dell'individuo, a quello più alto della vita stessa. Come nel caso dei gruppi neuronali concepiti da Edelman, l'equilibrio è sempre un equilibrio dinamico emergente da un'attività concertata nel rispetto di vincoli. Il rumore non è, come potrebbe rivelarsi nelle teorie istruzioniste, causa di disturbo, ma è la fonte stessa del significato, la base per la successiva selezione a un livello olistico di ordine superiore.¹⁰⁷

In questo quadro risulta possibile inferire che l'uomo è il solo essere vivente della nostra biosfera in cui la coscienza, oltre ad aver raggiunto un livello di sviluppo senza precedenti, rappresenta anche il suo tratto essenziale in quanto capace di meta-riflessione. Come sottolineato recentemente da Dehaene, anche se condividiamo con altre specie animali la maggior parte dei nostri sistemi cerebrali centrali, il cervello di *Homo sapiens* può essere unico nella sua capacità di combinarli utilizzando un *complesso linguaggio del pensiero*:

L'unicità umana risiede nella peculiare maniera con la quale noi formuliamo esplicitamente le nostre idee, usando strutture di simboli inserite una nell'altra o ricorsive.¹⁰⁸

7 Riflessioni conclusive

In virtù del singolare modo di essere cosciente, dunque, l'uomo ha la possibilità di staccarsi dalle sue dotazioni filogenetiche e ontogenetiche per essere anche altro da sé. In quest'ottica, considerando gli aspetti epigenetici dei più recenti risultati delle ricerche neuroscientifiche, si può inferire che non sarebbe irrazionale accettare la capacità dell'essere umano di traguardare la sua stessa naturalità biologica per divenire attore-costruttore di una realtà altra (una seconda natura),¹⁰⁹ irriducibile alla sola base bio-chimica, ma impossibile senza di essa. Allora la specificità della "natura" umana (dove l'invarianza è qui intesa come dinamica processualità di crescita per via selettiva)¹¹⁰ potrebbe consistere proprio nel manifestarsi come una "rivoluzione meta-biologica intersoggettiva" in continua coevoluzione con gli altri viventi e con il significato-ambiente di riferimento.

Note

¹ Cfr. T. PIEVANI, *How to rethink evolutionary theory*.

² Cfr. G. EDELMAN, *Topobiology*; G. TONONI, *Integrated information theory*.

- ³ Cfr. G. EDELMAN, *Darwinismo neurale*.
- ⁴ G. TONONI, *Come si misura la coscienza*.
- ⁵ Cfr. G. EDELMAN, G. TONONI, *Universo di coscienza*.
- ⁶ Cfr. S. LAUREYS, G. TONONI, *The neurology of consciousness*.
- ⁷ Ci riferiamo ad attività come pensare, conoscere, decidere.
- ⁸ Cfr. A. LAVAZZA, *L'uomo a due dimensioni*.
- ⁹ Cfr. A. CARSETTI, *Metabiology*.
- ¹⁰ Cfr. A. WEBER, F.J. VARELA, *Life after Kant*.
- ¹¹ F.J. VARELA, *La coscienza nelle neuroscienze*.
- ¹² Cf. G. EDELMAN, *Darwinismo neurale*.
- ¹³ G. EDELMAN, *Sulla materia della mente*, p. 49.
- ¹⁴ *Ivi*, p. 55.
- ¹⁵ *Ivi*, p. 40.
- ¹⁶ *Ivi*, p. 96.
- ¹⁷ Cfr. G. EDELMAN, *Il presente ricordato*.
- ¹⁸ G. EDELMAN, *Sulla materia della mente*, p. 257.
- ¹⁹ *Ivi*, pp. 90-91.
- ²⁰ Cfr. J. POLKINGHORNE, *Riduzionismo*.
- ²¹ Cfr. A. STEPHAN, *L'emergenza fenomenica*.
- ²² *Ivi*, p. 174.
- ²³ *Ivi*, p. 189.
- ²⁴ *Ivi*, p. 190.
- ²⁵ *Ivi*, p. 174.
- ²⁶ *Ivi*, p. 261.
- ²⁷ *Ivi*, p. 187.
- ²⁸ *Ivi*, p. 190.
- ²⁹ *Ivi*, p. 204.
- ³⁰ *Ibidem*.
- ³¹ *Ivi*, p. 195.
- ³² Cfr. A.K. ENGEL, A. MAYE, M. KUTHEN, P. KONIG, *Where's the action?*.
- ³³ G. EDELMAN, *Sulla materia della mente*, p. 204.
- ³⁴ Cfr. G. EDELMAN, *Più grande del cielo*.
- ³⁵ Cfr. G. EDELMAN, J.P. CHANGEUX (eds), *The brain*.
- ³⁶ G. EDELMAN, *Sulla materia della mente*, p. 206.
- ³⁷ *Ivi*, p. 233.
- ³⁸ *Ivi*, p. 252.
- ³⁹ Cfr. p. 255
- ⁴⁰ Cfr. L. GABORA, S. KAUFFMAN, *Toward an evolutionary-predictive foundation for creativity*.
- ⁴¹ Cfr. F. ZENK, E. LOESER, R. SCHIAVO, F. KILPERT, O. BOGDANOVIC, N. IOVINO, *Germ line-inherited H3K27me3 restricts enhancer function during maternal-to-zygotic transition*.
- ⁴² Cfr. Y. ZHANG, Q. CHEN, *The expanding repertoire of hereditary information carriers*.
- ⁴³ Cfr. E. JABLONKA, M.J. LAMB, *The inheritance of acquired epigenetic variations*.
- ⁴⁴ Cfr. S.A. KAUFFMAN, *Evolution beyond entailing law*.
- ⁴⁵ G. EDELMAN, *Sulla materia della mente*, p. 253.
- ⁴⁶ Cfr. G. EDELMAN, *Darwinismo neurale*.
- ⁴⁷ Cfr. G. EDELMAN, *Il presente ricordato*.
- ⁴⁸ Cfr. G. EDELMAN, *Topobiology*.
- ⁴⁹ Cfr. G. LIOTTI, *La dimensione interpersonale della coscienza*.
- ⁵⁰ *Ivi*, p. 25.
- ⁵¹ Cfr. G. EDELMAN, *Il presente ricordato*.
- ⁵² Cfr. J.L. MCKINSTY, G. EDELMAN, *Temporal sequence learning in winner-take-all networks of spiking neurons demonstrated in a brain-based device*.
- ⁵³ Cfr. G. EDELMAN, J. GALLY, B. J. BAARS, *Biology of consciousness*.
- ⁵⁴ Si pensi, per esempio, al sorriso umano che può essere rappresentativo di amore, ironia, sfida etc.
- ⁵⁵ Cfr. M. BUBER, *Il principio dialogico*; D. STERN, *Il mondo interpersonale del bambino*.
- ⁵⁶ Cfr. l'articolo di Edelman del 1993 *Neural Darwinism*; cfr. anche G. EDELMAN, *Naturalizing consciousness*.
- ⁵⁷ Cfr. D.C. DENNETT, *Coscienza*.
- ⁵⁸ Cfr. G. EDELMAN, J.A. GALLY, *Degeneracy and complexity in biological systems*.
- ⁵⁹ Cfr. M. AMMANITI, V. GALLESE, *La nascita dell'intersoggettività*.
- ⁶⁰ Cfr. M. TOMASELLO, *Becoming human*.
- ⁶¹ Cfr. M. TOMASELLO, *Le origini culturali della cognizione umana*; M. TOMASELLO, *Unicamente umano*.
- ⁶² Cfr. J. BOWLBY, *Attaccamento e perdita*.
- ⁶³ Cfr. G. TONONI, O. SPORNS, G. EDELMAN, *A complexity measure for selective matching of signals by the brain*; G. EDELMAN, G. TONONI, *Come la materia diventa immaginazione*.
- ⁶⁴ Cfr. E.R. KANDEL, *The molecular biology of memory storage*; R.J. FELLING, H. SONG, *Epigenetic mechanisms of neuroplasticity and the implications for stroke recovery*.
- ⁶⁵ Bergson in *Materia e memoria* scrive: «il cervello non deve [...] essere altro, a nostro avviso, se non una sorta di ufficio telefonico centrale: il suo ruolo è quello di "fornire la comunicazione" o di mettere in attesa. Esso non aggiunge nulla a quello che riceve [...] ma costituisce realmente un centro» (H. BERGSON, *Materia e memoria*, p. 23).
- ⁶⁶ C. MALABOU, *Cosa fare del nostro cervello?*, p. 52.
- ⁶⁷ G. EDELMAN, *Seconda natura*, p. 52.
- ⁶⁸ Cfr. H.N. BADER, L.M. BIERER, A. LEHRNER, I. MAKOTKINE, N.P. DASKALAKIS, R. YEHUDA, *Maternal age at holocaust exposure and maternal PTSD independently influence urinary cortisol levels in adult offspring*; E.J. RADFORD, M. ITO, H. SHI, J.A. CORISH, Y. YAMAZAWA, E. ISGANAITIS, S. SEISENBERGER, T.A. HORE, W. REIK, S. ERKEK, A.H.F.M. PETERS, M.-E. PATTI, A.C. FERGUSON-SMITH, *In utero effects*.
- ⁶⁹ Cfr. A. SALE, N. BERARDI, L. MAFFEI, *Environment and brain plasticity*; E. KANDEL, *The new science of mind and the future of knowledge*.
- ⁷⁰ Cfr. P. BATESON E P. GLUCKMAN, *Plasticità, robustezza, sviluppo ed evoluzione*.
- ⁷¹ In *Darwinismo neurale*, Edelman afferma il carattere intrinsecamente stocastico e probabilistico dei meccanismi che guidano lo sviluppo: a partire dalla morfogenesi embrionale, e lungo tutta la vita dell'organismo, l'esclusività "uno-a-uno" nel rapporto gene-proteina lascia il posto a una "libertà molecolare" dai connotati olistici. In questa prospettiva al paradigma genetico *istruzionista* di elaborazione di informazione deve subentrarne uno *selezionista* che renda ragione della complessità irriducibile di ogni sistema vivente immerso nella sua nicchia evolutiva.
- ⁷² Cfr. M. MERLEAU-PONTY, *La natura*; G. EDELMAN, G. TONONI, *Un universo di coscienza*.
- ⁷³ Cfr. W.J. FREEMAN, *Come pensa il cervello*; D.J. SIEGEL, *La mente relazionale*.
- ⁷⁴ Cfr. G. EDELMAN, *Seconda natura*.
- ⁷⁵ Cfr. G. TONONI, *An information integration theory of consciousness*, p. 42; G. TONONI, *Consciousness as integrated information*; G. TONONI, *Integrated information theory of consciousness*; G. TONONI, C. KOCH, *Consciousness: Here, there and everywhere?*.
- ⁷⁶ Significativo il caso di un soggetto in stato vegetativo che si rivelò cosciente agli stimoli del mondo esterno grazie alla risonanza magnetica funzionale. Cfr. A.M. OWEN, M.R. COLEMAN, M. BOLY, M.H. DAVIS, S. LAU-

REYS, J.D. PICKARD, *Detecting awareness in the vegetative state*, p. 1402.

⁷⁷ M. MASSIMINI, M. BOLY, A. CASALI, M. ROSANOVA, G. TONONI, *A perturbational approach for evaluating the brain's capacity for consciousness*.

⁷⁸ Cfr. D. FERNÁNDEZ-ESPEJO, A.M. OWEN, *Detecting awareness after severe brain injury*.

⁷⁹ Cfr. T. BAYNE, J. HOHWY, A. M. OWEN, *Are there levels of consciousness?*

⁸⁰ Cfr. G. EDELMAN, *Il presente ricordato*, pp. 169-178.

⁸¹ G. TONONI, *Galileo e il fotodiodo*, p. 26.

⁸² Cf. C. SHANNON, *A mathematical theory of communication*; C. SHANNON, W. WEAVER, *The mathematical theory of communication*.

⁸³ G. TONONI, *Galileo e il fotodiodo*, p. 28.

⁸⁴ Cfr. G. TONONI, *PHI. Un viaggio dal cervello all'anima*.

⁸⁵ G. TONONI, *Galileo e il fotodiodo*, p. 29

⁸⁶ *Ivi*, p. 32.

⁸⁷ Cfr. D. BALDUZZI, G. TONONI, *Integrate information in discrete dynamical systems*, p. 6.

⁸⁸ Cfr. I. PRIGOGINE, *Les lois du chaos*.

⁸⁹ Cfr. S. KAUFFMAN, *Humanity in a creative universe*.

⁹⁰ Cfr. A.K. SETH, E. IZHIKEVICH, G. REEKE, G.M. EDELMAN, *Theories and measures of consciousness*.

⁹¹ Cfr. G. TONONI, C. KOCH, *Consciousness*.

⁹² Cfr. D. RUDRAUF, D. BENNEQUIN, I. GRANIC, G. LANDINI, K. FRISTON, K. WILLIFORD, *A mathematical model for embodied consciousness*.

⁹³ A.K. SETH, E. IZHIKEVICH, G. REEKE, G. EDELMAN, *Theories and measures of consciousness*, p. 10800.

⁹⁴ M.A. CERULLO, *Problems with Phi*, p. 9.

⁹⁵ Cfr. A. SARTI, G. CITTI, D. PIOTROWSKI, *Differential heterogenesis and the emergence of semiotic function*.

⁹⁶ Cfr. J. PETITOT, *Neurogeometry of neural functional architectures*.

⁹⁷ Cfr. M. DI BERNARDO, *Form, function and value in the emerging and self-organizing processes of the natural evolution*.

⁹⁸ Cfr. J. HINTIKKA, *Surface information and depth information*.

⁹⁹ Cfr. A. CARSETTI, *Metabiology*.

¹⁰⁰ Cfr. A. CARSETTI, *The emergence of meaning at the co-evolutionary level*.

¹⁰¹ Cfr. A.N. KOLMOGOROV, *Three approaches for defining the concept of information quantity*; G. CHAITIN, *Algorithmic information theory*.

¹⁰² Cfr. I. LICATA, *La logica aperta della mente*.

¹⁰³ Cfr. N.A. BAAS, C. EMMECHE, *On emergence and explanation*.

¹⁰⁴ Cfr. C. EMMECHE, K. KULL (eds.), *Towards a semiotic biology*.

¹⁰⁵ Si vedano in questa prospettiva di ricerca anche i più recenti lavori sulla teoria dell'apertura logica: G. MINATI, E. PESSA, I. LICATA (eds), *Second generation general system theory*.

¹⁰⁶ I. KANT, *Critica della facoltà di giudizio*, p. 207.

¹⁰⁷ G. EDELMAN, *Il presente ricordato*, p. 247.

¹⁰⁸ S. DEHAENE, *Coscienza e cervello*, pp. 335-336.

¹⁰⁹ Cfr. G. EDELMAN, *Seconda natura*.

¹¹⁰ Cfr. G. EDELMAN, *Darwinismo neurale*.

BAAS, N.A., EMMECHE, C. (1997). *On emergence and explanation*. In: «Intellectica», vol. XXV, pp. 67-83.

BADER, H.N., BIERER, L.M., LEHRNER, A., MAKOTKINE, I., DASKALAKIS, N.P., YEHUDA, R. (2014). *Maternal age at holocaust exposure and maternal PTSD independently influence urinary cortisol levels in adult offspring*. In: «Frontiers in Endocrinology», vol. V, Art.Nr. 103 – doi: 10.3389/fendo.2014.00103.

BALDUZZI, D., TONONI, G. (2008). *Integrate information in discrete dynamical systems: Motivation and theoretical framework*. In: «PLoS Computational Biology», vol. IV, Art. Nr. 91 – doi: 10.1371/journal.pcbi.1000091.

BATESON, P., GLUCKMAN, P. (2012). *Plasticità, robustezza, sviluppo ed evoluzione*, Aboca, Sansepolcro.

BAYNE, T., HOHWY, J., OWEN, A.M. (2016). *Are there levels of consciousness?*. In: «Trends in Cognitive Sciences», vol. XX, n. 6, pp. 405-413.

BERGSON, H. (1996). *Materia e memoria. Saggio sulla relazione tra il corpo e lo spirito* (1896), traduzione di A. PESSINA, Laterza, Roma/Bari.

BOWLBY, J. (2000). *Attaccamento e perdita* (1969), vol. I, traduzione di L. SCHWARZ, A.M. SCHEPISI, Bollati Boringhieri, Torino.

BUBER, M. (1993). *Il principio dialogico e altri saggi* (1954), traduzione di A.M. PASTORE, Edizioni San Paolo, Milano.

CARSETTI, A. (2012). *The emergence of meaning at the co-evolutionary level: An epistemological approach*. In: «Applied Mathematics and Computation», vol. CCXIX, n. 1, pp. 14-23.

CARSETTI, A. (2020). *Metabiology*, Springer, Berlin.

CERULLO, M.A. (2015). *Problems with Phi: A critique of integrated information theory*. In: «PLoS Computational Biology», vol. XI, n. 9, Art. Nr. e1004286 - doi: 10.1371/journal.pcbi.1004286.

CHAITIN, G. (1988). *Algorithmic information theory*, Cambridge University Press, Cambridge.

DEHAENE, S. (2014). *Coscienza e cervello. Come i neuroni codificano il pensiero*, traduzione di P.L. GASPA, Raffaello Cortina, Milano.

DENNETT, D.C. (1993). *Coscienza. Che cosa è* (1991), traduzione di L. COLASANTI, Rizzoli, Milano.

DI BERNARDO, M. (2020). *Form, function and value in the emerging and self-organizing processes of the natural evolution*. In: «Thaumàzein», vol. VIII, pp. 204-225.

EDELMAN, G. (1988). *Topobiology: An introduction to molecular embryology*, Basic Books, New York.

EDELMAN, G. (1992). *Il presente ricordato. Una teoria biologica della coscienza* (1990), traduzione di L. SOSIO, Rizzoli, Milano.

EDELMAN, G. (1992). *Sulla materia della mente* (1993), traduzione di S. FREDIANI, Adelphi, Milano.

EDELMAN, G. (1993). *Neural Darwinism: Selection and reentrant signaling in higher brain function*. In: «Neuron», vol. X, n. 2, pp. 115-125.

EDELMAN, G. (1995). *Darwinismo neurale. La teoria della selezione dei gruppi neuronali* (1987), traduzione di S. FERRARESI, Raffaello Cortina, Milano.

EDELMAN, G. (2003). *Naturalizing consciousness: A theoretical framework*. In: «Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America», vol. C, n. 9, pp. 5520-5524.

EDELMAN, G. (2004). *Più grande del cielo. Lo straordinario dono fenomenico della coscienza*, traduzione di S. FREDIANI, Einaudi, Torino.

Riferimenti bibliografici

AMMANITI, M., GALLESE, V. (2014). *La nascita dell'intersoggettività. Lo sviluppo del sé tra psicodinamica e neurobiologia*, Raffaello Cortina, Milano.

- EDELMAN, G. (2007). *Seconda natura. Scienza del cervello e conoscenza umana*, traduzione di S. FREDIANI, Raffaello Cortina, Milano.
- EDELMAN, G., CHANGEUX, J.P. (eds.) (2000). *The brain*, Transaction Publishers, London.
- EDELMAN, G., GALLY, J., BAARS, B.J. (2011). *Biology of consciousness*. In: «Frontiers in Psychology», vol. II, Art. Nr. 4 – doi: 10.3389/fpsyg.2011.00004.
- EDELMAN, G., GALLY, J.A. (2001). *Degeneracy and complexity in biological systems*. In: «Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America», vol. XCVIII, n. 24, pp. 13763-13768.
- EDELMAN, G., TONONI, G. (2000). *Un universo di coscienza*, traduzione di S. FERRARESI, Einaudi, Torino.
- EMMECHE, C., KULL, K. (eds.) (2010), *Towards a semiotic biology. Life is the action of signs*, World Scientific, London/Singapore.
- ENGEL, A.K., MAYE, A., KUTHEN, M., KONIG, P. (2013). *Where's the action? The pragmatic turn in cognitive science*. In: «Trends in Cognitive Sciences», vol. XVII, n. 5, pp. 202-208.
- FELLING, R.J., SONG, H. (2015). *Epigenetic mechanisms of neuroplasticity and the implications for stroke recovery*. In: «Experimental Neurology», vol. CCLXVIII, pp. 37-45.
- FERNÁNDEZ-ESPEJO, D., OWEN, A.M. (2013). *Detecting awareness after severe brain injury*. In: «Nature Reviews Neuroscience», vol. XIV, n. 11, pp. 801-809.
- FREEMAN, W.J. (2000). *Come pensa il cervello*, traduzione di S. FREDIANI, Einaudi, Torino.
- GABORA, L., KAUFFMAN, S. (2016). *Toward an evolutionary-predictive foundation for creativity*. In: «Psychonomic Bulletin & Review», vol. XXIII, n. 2, pp. 632-639.
- HINTIKKA, J. (1970). *Surface information and depth information*. In: J. HINTIKKA, J. SURFACE (eds.), *Information and inference*, Dordrecht, Kluwe, pp. 298-330.
- JABLONKA, E., LAMB, M.J. (2015). *The inheritance of acquired epigenetic variations*. In: «International Journal of Epidemiology», vol. XLIV, n. 4, pp. 1094-1103.
- KANDEL, E. (2001). *The molecular biology of memory storage: a dialogue between genes and synapses*. In: «Science», vol. CCXCIV, n. 5544, pp. 1030-1038.
- KANDEL, E. (2013). *The new science of mind and the future of knowledge*. In: «Neuron», vol. LXXX, n. 3, pp. 546-560.
- KANT, I. (1999). *Critica della facoltà di giudizio (1790)*, a cura di E. GARRONI, H. HOHENEGGER, Einaudi, Torino.
- KAUFFMAN, S. (2016). *Humanity in a creative universe*, Oxford University Press, Oxford/New York.
- KAUFFMAN, S.A. (2014). *Evolution beyond entailing law: The roles of embodied information and self-organization*. In: R.J. MARKS, M.J. BEHE, W.A. DEMBSKI, B.L. GORDON, J.C. SANFORD (eds.), *Biological information. New perspectives*, World Scientific Publishing, London, pp. 513-532.
- KOLMOGOROV, A.N. (1964). *Three approaches for defining the concept of information quantity*. In: «Problemy Peredachi Informatsii», vol. I, n. 1, pp. 3-11.
- LAUREYS, S., TONONI, G. (2009). *The neurology of consciousness: Cognitive neuroscience and neuropathology*, Elsevier, Amsterdam.
- LAVAZZA, A. (2008). *L'uomo a due dimensioni. Il dualismo mente-corpo oggi*, Mondadori, Milano.
- LICATA, I. (2008). *La logica aperta della mente*, Codice Edizioni, Torino.
- LIOTTI, G. (2005). *La dimensione interpersonale della coscienza*, Carocci, Roma/Bari.
- MALABOU, C. (2007). *Cosa fare del nostro cervello?*, traduzione di E. LATTAVO, G. BIOLGHINI, Armando, Roma.
- MASSIMINI, M., BOLY, M., CASALI, A., ROSANOVA, M., TONONI, G. (2009). *A perturbational approach for evaluating the brain's capacity for consciousness*. In: «Progress in Brain Research», vol. CLXXVII, pp. 201-214.
- McKINSTRY, J.L., EDELMAN, G. (2013). *Temporal sequence learning in winner-take-all networks of spiking neurons demonstrated in a brain-based device*. In: «Frontiers in Neurobotics», vol. VI, Art. Nr. 10 – doi: 10.3389/fnbot.2013.00010.
- MERLEAU-PONTY, M. (1996). *La natura. Lezioni al Collège de France 1956-1960*, traduzione di M. MAZZOCUT MIS, Raffaello Cortina, Milano.
- MINATI, G., PESSA, E., LICATA, I. (eds.) (2017). *Second generation general system theory: Perspectives in philosophy and approaches in complex systems*, MDPI, Basel.
- OWEN, A.M., COLEMAN, M.R., BOLY, M., DAVIS, M.H., LAUREYS, S., PICKARD, J.D. (2006). *Detecting awareness in the vegetative state*. In: «Science», vol. CCCXIII, n. 5792, p. 1402.
- PETITOT, J. (2013). *Neurogeometry of neural functional architectures*. In: «Chaos, Solitons & Fractals», vol. L, pp. 75-92.
- PIEVANI, T. (2016). *How to rethink evolutionary theory: A plurality of evolutionary patterns*. In: «Evolutionary Biology», vol. XLIII, n. 4, pp. 446-455.
- POLKINGHORNE, J. (2002). *Riduzionismo*. In: G. TANZELLA-NITTI, A. STRUMIA, *Dizionario interdisciplinare di scienza e fede*, vol. II, Città Nuova, Roma, pp. 404-424.
- PRIGOGINE, I. (1993). *Les lois du chaos*, Flammarion, Paris.
- RADFORD, E.J., ITO, M., SHI, H., CORISH, J.A., YAMAZAWA, Y., ISGANAITIS, E., SEISENBERGER, S., HORE, T.A., REIK, W., ERKEK, S., PETERS, A.H.F.M., PATTI, M.-E., FERGUSON-SMITH, A.C. (2014). *In utero effects. In utero undernourishment perturbs the adult sperm methylome and intergenerational metabolism*. In: «Science», vol. CCCXLV, n. 6198, Art. Nr. 1255903 – doi: 10.1126/science.1255903.
- RUDRAUF, D., BENNEQUIN, D., GRANIC, I., LANDINI, G., FRISTON, K., WILLIFORD, K. (2017). *A mathematical model for embodied consciousness*. In: «Journal of Theoretical Biology», vol. CDXXVIII, pp. 106-131.
- SALE, A., BERARDI, N., MAFFEI, L. (2014). *Environment and brain plasticity: Towards an endogenous pharmacotherapy*. In: «Physiological Review», vol. XCIV, n. 1, pp. 189-234.
- SARTI, A., CITTI, G., PIOTROWSKI, D. (2019). *Differential heterogenesis and the emergence of semiotic function*. In: «Semiotica», vol. CCXXX, pp. 1-34.
- SETH, A.K., IZHIKEVICH, E., REEKE, G., EDELMAN, G. (2006). *Theories and measures of consciousness: An extended framework*. In: «Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America», vol. CIII, n. 28, pp. 10799-10804.
- SHANNON, C. (1948). *A mathematical theory of communication*. In: «Bell System Technical Journal», vol. XXVII, pp. 379-423 and pp. 623-656.
- SHANNON, C., WEAVER, W. (1949). *The mathematical theory of communication*, University of Illinois Press.
- SIEGEL, D.J. (2001). *La mente relazionale. Neurobiologia dell'esperienza interpersonale (1999)*, traduzione di

- L. MAEDDU, Raffaello Cortina, Milano.
- STEPHAN, A. (2004). *L'emergenza fenomenica*. In: «Networks», vol. III-IV, pp. 77-89.
- STERN, D. (1987). *Il mondo interpersonale del bambino* (1985), traduzione di A. BIOCCA, L. BIOCCA MARGHERI, Boringhieri, Torino.
- TOMASELLO, M. (2005). *Le origini culturali della cognizione umana*, Il Mulino, Bologna.
- TOMASELLO, M. (2014). *Unicamente umano. Storia naturale del pensiero*, traduzione di M. RICCUCCI, Il Mulino, Bologna.
- TOMASELLO, M. (2019). *Becoming human: A theory of ontogeny*, Harvard University Press.
- TONONI, G. (2003). *Galileo e il fotodiode. Cervello, complessità e coscienza*, Laterza, Roma/Bari.
- TONONI, G. (2004). *An information integration theory of consciousness*. In: «BMC Neuroscience», vol. V, Art. Nr. 42 – doi: 10.1186/1471-2202-5-42.
- TONONI, G. (2008). *Consciousness as integrated information: A provisional manifesto*. In: «The Biological Bulletin», vol. CCXV, n. 3, pp. 216-242.
- TONONI, G. (2012). *Integrated information theory of consciousness: An updated account*. In: «Archives Italiennes de Biologie», vol. CL, n. 2-3, pp. 56-90.
- TONONI, G. (2014). *PHI. Un viaggio dal cervello all'anima*, Codice, Torino.
- TONONI, G. (2015). *Integrated information theory*. In: «Scholarpedia», vol. X, n. 1, p. 4164.
- TONONI, G. (2016). *Come si misura la coscienza*. In: «Il Sole 24 ore», del 13 novembre 2016.
- TONONI, G., KOCH, C. (2015). *Consciousness: Here, there and everywhere?*. In: «Philosophical Transactions of the Royal Society - B», vol. CCCLXX, Art. Nr. 20140167 – doi: 10.1098/rstb.2014.0167.
- TONONI, G., SPORNS, O., EDELMAN, G. (1996). *A complexity measure for selective matching of signals by the brain*. In: «Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America», vol. XCIII, n. 8, pp. 3422-3427.
- VARELA, F.J. (2001). *La coscienza nelle neuroscienze*, conversazione con S. Benvenuto, disponibile online allo URL: <http://www.psychomedia.it/pm/science/psybyo/varela.htm>.
- WEBER, A., VARELA, F.J. (2002). *Life after Kant: Natural purposes and the autopoietic foundations of biological individuality*. In: «Phenomenology and the Cognitive Science», vol. I, n. 2, pp. 97-125.
- ZENK, F., LOESER, E., SCHIAVO, R., KILPERT, F., BOGDANOVIC, O., IOVINO, N. (2017). *Germ line-inherited H3K27me3 restricts enhancer function during maternal-to-zygotic transition*. In: «Science», vol. CCCLVII, n. 6347, 2017, pp. 212-216.
- ZHANG, Y., CHEN, Q. (2019). *The expanding repertoire of hereditary information carriers*. In: «Development», vol. CXLVI, n. 6, Art. Nr. dev170902 – doi: 10.1242/dev.170902.