

MARIO DI FEBBO

Appunti per

UN MODELLO MATEMATICO DELLA COSCIENZA

Scienza e Metafisica - XXXIX Convegno

In collaborazione con lo Studio Filosofico Domenicano di Bologna

e l'Istituto Filosofico di Studi Tomistici di Modena

Istituto "Villa San Giacomo", San Lazzaro di Savena, Bologna

1 – 3 ottobre 2021

Sommario

Scopo di questo breve saggio è quello di illustrare una linea di ricerca sulla coscienza, collegata alla Teoria dell'Informazione, nota come Integrated Information Theory (IIT) proposta dal neuroscienziato italiano Giulio Tononi insieme ad altri suoi illustri colleghi come il biologo statunitense Gerald Edelman, già direttore del Neurosciences Institute di San Diego (California) e vincitore del premio Nobel per la medicina nel 1972, per i suoi lavori sul sistema immunitario. Il saggio si conclude con una appendice in cui sono elencate le tappe più significative che hanno condotto a formulare varie interessanti ipotesi circa la possibile natura quantistica della coscienza.



INDICE

Quadro di riferimento

Integrated Information Theory (IIT)

Struttura matematica della IIT

Osservazioni e Critiche

Appendice - Modelli di coscienza quantistica

Bibliografia

1. QUADRO DI RIFERIMENTO

È estremamente difficile dare una definizione della coscienza, poiché non è possibile far riferimento agli ordinari oggetti del mondo fisico. Essa è un fenomeno privato che riguarda i vissuti di uno specifico individuo e che, tramite i metodi scientifici tradizionali, non permette alcuna rilevazione dall'esterno; il problema sembra risiedere nella struttura stessa del metodo scientifico, nel quale tradizionalmente l'osservatore è separato dall'oggetto di studio. Tale separazione è però incompatibile con un approccio verso la coscienza, poiché, in questo caso, ciò che studia i fenomeni (la nostra coscienza) coincide con ciò che si cerca di comprendere. La coscienza rappresenta un problema che i filosofi definiscono "the hard problem"¹. In prima approssimazione, la coscienza può essere definita come "presenza all'essere", presenza di un qualche contenuto a un ente che ne fa esperienza diretta e immediata, e che può esprimersi a diversi livelli e in diverse manifestazioni:

1. Livello delle esperienze sensoriali e percettive che, probabilmente, l'uomo condivide con gli animali a lui più vicini nella scala evolutiva;
2. Livello della consapevolezza dei propri stati emotivi e dei propri pensieri: è l'autocoscienza del vivere determinati contenuti mentali in cui l'essere si percepisce vivente e si distacca idealmente da sé stesso, rappresentandosi come oggetto di osservazione;
3. Livello morale: è un giudizio della ragione mediante il quale la persona umana riconosce la qualità morale di un atto concreto che sta per porre, sta compiendo o ha compiuto assumendosene la *responsabilità*.

Vediamo così che la coscienza, ponendosi a fondamento di ciò che chiamiamo libero arbitrio, può essere ritenuta la causa di una più efficace interazione di un organismo con l'ambiente rispetto a un organismo che invece ne fosse privo. E da questa riflessione prende le mosse la nostra analisi che si limiterà a considerare del precedente elenco il solo primo livello al quale la coscienza si manifesta.

2. INTEGRATED INFORMATION THEORY (IIT)

Una delle linee di ricerca delle neuroscienze cognitive che ha segnato la storia di questa disciplina è l'idea che lo studio del cervello può condurre ad una localizzazione precisa delle varie funzioni cognitive, individuando tra le varie aree che compongono il sistema nervoso

¹ The Economist, *The hard problem*, 12.09.2015, <http://www.economist.com/sciencebriefs>.

centrale (SNC) le specifiche regioni responsabili di ciascun processo mentale, da quelli di più basso livello (come la percezione sensoriale) a quelli più complessi (come il ragionamento e la coscienza). In anni recenti, gli studi di Giulio Tononi² si sono concentrati nella ricerca di un criterio oggettivo e scientifico per misurare la coscienza intesa nel senso prima specificato.

La sua analisi ha preso l'avvio dalla evidenza sperimentale della diversa importanza che rivestono le varie parti del SNC; alcune infatti sono fondamentali per la coscienza, altre invece seppur implicate in altri processi cognitivi, non sembrano contribuire significativamente alla coscienza.

Secondo Tononi³ una prima risposta alla domanda “dove risiede la coscienza?” intesa nel suo significato psicologico di percezione e consapevolezza ci viene dalla neuroanatomia. Riportiamo qui di seguito tre esperienze cliniche sulle quali Tononi ha elaborato la sua proposta.

Esperienza 1

Come mostrano numerosi casi clinici, lesioni anche lievi di alcune aree del sistema talamo-corticale (STC)⁴ possono provocare la totale perdita di coscienza e uno stato di coma irreversibile, o addirittura la morte cerebrale. Al contrario, nel caso della totale asportazione del cervelletto, i pazienti mostrano gravi deficit posturali e di deambulazione, ma nessuna delle loro funzioni cognitive sembra essere danneggiata. Ora, il STC è costituito da circa 21 miliardi di neuroni, mentre il cervelletto, sebbene più piccolo, di neuroni ne possiede il triplo; dunque, per quanto detto poc'anzi, si può dedurre che il numero di neuroni, che è sicuramente un indice della complessità dell'organo, non può giustificare da solo il differente contributo all'esperienza cosciente; Tononi ha quindi proposto di concentrare l'attenzione sulla differente organizzazione delle connessioni sinaptiche di queste due strutture⁵:

“[...] i moduli della corteccia cerebrale, per quanto altamente specializzati, sono abbondantemente collegati fra loro, al contrario [...] l'organizzazione delle connessioni nel cervelletto sembra fatta apposta per garantire che, quando ad esempio i segnali somato-sensoriali raggiungono il modulo appropriato, essi vi rimangano confinati e non influenzino i moduli né vicini né lontani.”

Le differenze anatomiche fra STC e cervelletto tuttavia non spiegano per quale motivo un numero elevato di neuroni e una particolare organizzazione strutturale debbano essere proprietà importanti per l'emergere della coscienza.

Esperienza 2

È un fenomeno noto a tutti che la coscienza, nel sonno profondo, diminuisce gradualmente

2 Giulio Tononi (Trento, 1960) è professore di psichiatria all'Università del Wisconsin, dove dirige il Center for Sleep and Consciousness. È una delle massime autorità mondiali riconosciute nello studio della genetica e dell'eziologia del sonno.

3 G. Tononi, Galileo e il fotodiode, Laterza 2003.

4 Il sistema talamo-corticale (STC) è composto dal talamo, una struttura profonda situata nel diencefalo, e dalla corteccia cerebrale, un sottile strato di neuroni che costituisce la parte più esterna del telencefalo.

5 G. Tononi, op.cit, p. 97.

fino a scomparire del tutto. Ciò che cambia però non è la struttura anatomica del cervello, bensì è il regime funzionale dell'intero STC a mutare poiché la diminuzione di particolari tipi di neuromodulatori⁶ provoca uno stato di minore eccitabilità dei neuroni corticali: in questa condizione, a parità di ingressi, diviene più difficile e più raro che i neuroni raggiungano la soglia oltre la quale vengono generati i potenziali d'azione. Quando questa condizione di depressione neuronale interessa un numero elevato di neuroni, il numero totale di impulsi nervosi che circola a livello corticale è così scarso che molte altre cellule neuronali, private della quantità normale di ingressi, smettono anch'esse di scaricare. Questo stato sarà caratterizzato da una forte riduzione dell'informazione effettiva tra le differenti parti del cervello, oltreché da una diminuzione del repertorio di stati possibili, e quindi di risposte differenziate, di cui il sistema è capace.

Esperienza 3

Nei pazienti sottoposti a “callosotomia”⁷, i cosiddetti *split-brain*, studiati particolarmente da Michael Gazzaniga⁸, si presenta una vera e propria “coscienza sdoppiata” in quanto, dopo la separazione, gli emisferi cerebrali proseguono nella loro attività di elaborazione degli stimoli esterni, senza tuttavia condividere le informazioni sensoriali. Gazzaniga ha mostrato che tali pazienti non sono in grado di reagire razionalmente a stimolazioni sensoriali dell'emisfero destro, poiché le informazioni non sono accessibili all'emisfero sinistro in cui è principalmente localizzato il linguaggio. Tali soggetti talvolta mostrano di voler compiere con la mano sinistra un'azione, per esempio abbottonare la camicia e con la mano destra l'azione contraria, sbottonarla⁹.

Sulla base di tali esperienze, ma non solo, Tononi si è convinto che la coscienza manifestata dal cervello sia funzione di due variabili:

- a) la quantità di informazione che è elaborabile da ogni singola parte;
- b) il grado di interconnessione presente tra le varie parti deputate ad elaborare quel tipo di informazione.

⁶ Come la noradrenalina e l'acetilcolina.

⁷ Tale operazione consiste nel separare i due emisferi cerebrali sezionando il corpo calloso, il principale fascio di fibre nervose che li mette in comunicazione, ed è finalizzata alla cura di tipi particolarmente gravi di epilessie non trattabili farmacologicamente (M. Gazzaniga, *Neuroscienze Cognitive*, Zanichelli, Bologna, 2005).

⁸ Michael Gazzaniga (Los Angeles, 1939) è uno dei più importanti neuroscienziati del mondo, professore di psicologia all'Università della California dove dirige il SAGE Center for the Study of the Mind.

⁹ questo genere di fenomeno caratterizza la patologia nota come “sindrome della mano aliena” (Gazzaniga, 2005 op.cit).

In sintesi, abbiamo visto che considerare la coscienza come l'aver luogo di un certo processo fisico (l'integrazione rapida di una grande quantità di informazione entro un nucleo dinamico integrato) rende conto di tre sue caratteristiche fondamentali:

1. l'informatività,
2. l'integrazione,
3. la soggettività.

La coscienza è varia, multimodale, ricca di contesto e di passato perché comprende una grande quantità di informazione; è unitaria, perché tale informazione è integrata, è dinamica, perché l'informazione integrata cambia di momento in momento, se pur con una certa inerzia; e possiede una soggettività intrinseca, perché il nucleo dinamico entro cui avviene l'integrazione dell'informazione è un processo dai confini fisici abbastanza netti. Tale nozione ci spiega anche come certe strutture, di cui l'unica di cui abbiamo conoscenza diretta è il cervello umano, siano necessarie perché abbia luogo questo tipo di processo.¹⁰

Tononi, per definire la coscienza, ha proposto un originale modello, denominato *Integrated Information Theory* (IIT), che attualmente la comunità scientifica considera uno dei più promettenti filoni di ricerca nel campo delle neuroscienze.

Una illustrazione divulgativa dei concetti che stanno alla base di tale modello è contenuta nel suo libro *Galileo e il fotodiodo* del 2003 in cui Tononi propone una serie di due esperimenti mentali volti a mettere in luce la fondamentale relazione che sussiste fra informazione e coscienza, comparando le performance di due differenti sistemi, una persona, nella fattispecie Galileo, ed un fotodiodo, rispetto a un compito cognitivo molto semplice: uno schermo bianco su cui vengono proiettati impulsi luminosi e due soggetti, Galileo ed un fotodiodo, ai quali si chiede di fornire la risposta "luce" quando lo schermo è illuminato e la risposta "buio" quando lo schermo non è illuminato. Successivamente il fotodiodo viene sostituito da una telecamera digitale che sostanzialmente possiamo considerare come un agglomerato di fotodiodi (*pixel*). Senza descrivere l'esperimento in dettaglio, ci limitiamo qui a riferire le conclusioni a cui Tononi è giunto.

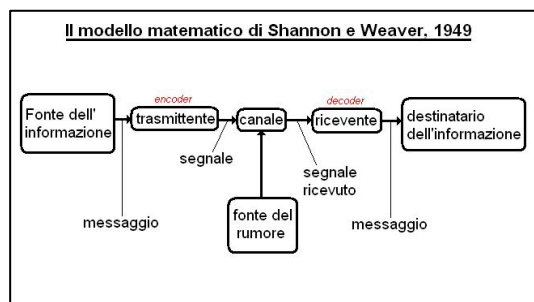
1. "l'esperienza cosciente è differenziata, ossia il repertorio potenziale di stati di coscienza diversi è straordinariamente grande. Ciò significa che il substrato della coscienza deve avere a disposizione un repertorio altrettanto grande di stati diversi" (Tononi, 2003, p. 90). Il repertorio di stati possibili è ciò che distingue un sistema semplice come un fotodiodo da un individuo cosciente come Galileo. Il concetto di "entropia" e quindi di

¹⁰ Giulio Tononi, *Per un modello interpretativo della mente*, Scienza e Filosofia n.3, 2010
<http://www.scienzaefilosofia.com/2018/03/25/per-un-modello-interpretativo-della-mente/>

“informazione effettiva” è la misura matematica che permette di misurare l'ampiezza del repertorio di stati, ovvero la differenziazione delle risposte di un sistema.

2. Dal secondo esperimento mentale, quello che vede un confronto fra Galileo e una telecamera, Tononi trae la conclusione che il substrato della coscienza è costituito da un'entità unica tale che l'informazione integrata fra due qualsiasi parti del sistema sia necessariamente superiore a zero. I concetti di “informazione integrata” e “complessità” hanno infatti permesso di discriminare fra un sistema come la telecamera, unitario e complesso solo in apparenza in quanto composto da un numero enorme di piccoli sottosistemi molto semplici (milioni di pixel), e un sistema unitario come il cervello di Galileo, un vero e proprio “complesso” in grado di integrare elevate quantità di informazione.

Per descrivere in termini rigorosi la differenza fra un sistema non-cosciente come un fotodiodo e un sistema cosciente come Galileo, Tononi si richiama al Modello di Shannon-Weaver in cui il concetto di informazione poggia le proprie basi su quello di entropia (H), ovvero la misura della quantità di “incertezza” presente in un segnale aleatorio.



La misura dell'entropia di un evento può essere considerata equivalente ad una misura dell'informazione veicolata dal realizzarsi di quel medesimo evento. Infatti, se l'entropia corrisponde all'incertezza, l'informazione viene definita classicamente come una misura della “riduzione dell'incertezza”.

Sappiamo che la misura in bit della quantità di informazione H associata a un evento di probabilità P è data da:

$$H = -\log_2 P$$

L'unità di misura dell'informazione, pari ad 1 bit, è definita come la scelta fra due eventi possibili ed equiprobabili.

Nell'esperimento mentale di *Galileo e il fotodiodo* le risposte del fotodiodo saranno descrivibili in termini di entropia, essendo esse entrambe eventi casuali ed equiprobabili. Ogni risposta in

output del fotodiodo inoltre corrisponderà ad uno dei suoi due possibili stati interni, di conseguenza potremmo dire che l'entropia delle risposte del fotodiodo (H_F), così come l'entropia del repertorio dei suoi stati possibili, sarà:

$$H_F = 1 \text{ bit}$$

Inoltre, considerando la relazione fra entropia e informazione, potremmo anche dire che ogni stato assunto dal sistema fotodiodo, e quindi ogni risposta generata in *output*, conterrà 1 bit di informazione.

Un altro modo di calcolare la quantità di informazione per ogni stato è quello di considerare il numero (R) di stati possibili di un sistema; dato che tutti gli stati sono equiprobabili, la probabilità di realizzarsi di ogni singolo stato sarà uguale al reciproco del numero di stati possibili:

$$H = \log_2 (R)$$

Su questa equivalenza Informazione-Entropia si basa la teoria espressa da Tononi che è oggetto del prossimo capitolo.

3. STRUTTURA MATEMATICA DELLA IIT

La trattazione che segue è stata ripresa dall'articolo:

G. Tononi, O. Sporns, G. Edelman

A measure for brain complexity. Relating functional segregation and integration in the nervous sistema

Proc. Natl. Acad. Sci. USA. Vol. 91, pp. 5033-5037, May 1994. Neurobiology

e dal più recente

G. Tononi, *An information integration theory of consciousness*,

BMC Neuroscience 5(1), 42 (2004)

<https://doi.org/10.1186/1471-2202-5-42>,

<http://www.biomedcentral.com/1471-2202/5/42>

Consideriamo un sistema neurale isolato X con n componenti elementari (gruppi neuronali) e assumiamo che la sua attività sia descritta da un processo stocastico stazionario multidimensionale¹¹. La funzione che descrive la densità di probabilità di un tale processo multivariato può essere caratterizzata in termini di collegamento tra entropia e mutua informazione, qui utilizzati esclusivamente nelle loro connotazioni statistiche¹²; in particolare non si fa alcun riferimento ai messaggi, né ai codici, né al rumore sul canale di trasmissione. Come si vedrà nel prossimo capitolo è proprio sull'assenza, nel modello IIT, dei concetti di messaggio (nel senso semantico), di codice e di rumore, che si appuntano le critiche di alcuni

¹¹ Papoulis A., Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, McGraw-Hill, New York 1991.

¹² Shannon C. E., Weaver W., The Mathematical Theory of Communication, Univ. Illinois Press, Chicago 1949

importanti esponenti della comunità scientifica.

Se le componenti del sistema sono indipendenti, l'entropia è massima. Se ci sono vincoli intrinseci nel sistema, le componenti deviano dalla indipendenza statistica e l'entropia si riduce. La deviazione dall'indipendenza può venire misurata in termini di mutua informazione. A titolo d'esempio si consideri una bipartizione del sistema X nel sottoinsieme j^{th} X_j^k composto da k componenti ed il suo complemento $X - X_j^k$.

L'informazione mutua (MI) tra X_j^k e $X - X_j^k$ è

$$MI(X_j^k; X - X_j^k) = H(X_j^k) + H(X - X_j^k) - H(X), \quad [1]$$

dove $H(X_j^k)$ e $H(X - X_j^k)$ sono i valori di entropia associati ai sistemi: X_j^k e $X - X_j^k$ considerati indipendentemente, e $H(X)$ è l'entropia del sistema considerato nella sua interezza¹³.

Risulta che: $MI = 0$ se X_j^k e $X - X_j^k$ sono statisticamente indipendenti mentre, nel caso contrario, risulta che $MI > 0$.

Importanti proprietà di MI sono:

- 1) la simmetria: $[MI(X_j^k; X - X_j^k) = MI(X - X_j^k; X_j^k)]$;
- 2) l'invarianza rispetto ad un cambiamento di variabili¹⁴.

Il concetto di mutua informazione può essere generalizzato per esprimere la deviazione dall'indipendenza tra le n componenti di un qualunque sistema X per mezzo di una singola misura, che noi chiameremo la sua integrazione $I(X)$.

$I(X)$ è definita come la differenza tra la somma delle entropie di tutte le singole componenti $\{x_i\}$ considerate indipendentemente e l'entropia of X considerata nella sua interezza:

$$I(X) = \sum_i H(x_i) - H(X) \quad (i = 1 \div n) \quad [2]$$

Nel caso di una bipartizione, sostituendo nella [2] l'espressione di $H(X)$ della [1] si ottiene:

$$I(X) = I(X_j^k) + I(X - X_j^k) + MI(X_j^k; X - X_j^k) \quad [3]$$

Poiché $MI \geq 0$ risulta anche:

$$I(X) \geq I(X_j^k) + I(X - X_j^k)$$

che si reduce ad un'eguaglianza nel caso di indipendenza.

Si noti che, dalla [3], $I(X)$ si esprime anche come la somma dei valori della mutua informazione tra le parti risultanti dalla bipartizione ricorsiva di X nelle sue componenti elementari.

In particolare, eliminando una componente per volta, si ha

¹³ Papoulis A., cit.

¹⁴ Papoulis A., cit.

$$I(X) = \sum MI(\{x_i\}; \{x_{i+1}, \dots, x_n\}) \quad (i = 1 \div n-1)$$

Anziché considerare l'intero sistema X , consideriamo ora i sottoinsiemi X^k composti da k su n componenti ($1 \leq k \leq n$)¹⁵. L'integrazione media per i sottoinsiemi di dimensione k è denotata come $(I(X_j^k))$, dove l'indice j indica che la media è presa su tutte le $n!/(k!(n-k)!)$ combinazioni di k componenti.

Si noti che $(I(X_j^n)) = I(X)$, mentre $(I(X_j^1)) = 0$.

Dalla [3] risulta che

$$(I(X_j^{k+1})) \geq (I(X_j^k))$$

E ciò sta ad indicare che $(I(X_j^k))$ è monotona crescente all'aumentare di k .

Definiamo ora la complessità $C_N(X)$ di un sistema X come la differenza tra i valori attesi di $(I(X_j^k))$ per un incremento lineare delle dimensioni dei sottoinsiemi k ed i valori discreti effettivi osservati:

$$C_N(X) = \sum_k [(k/n)I(X) - (I(X_j^k))] \quad (k = 1 \div n) \quad [4]$$

Si noti che, al pari di $I(X)$, anche $C_N(X) \geq 0$.

Secondo la [4], $C_N(X)$ è alta quando l'integrazione del sistema è alta e, allo stesso tempo, l'integrazione media per piccoli sottoinsiemi è minore di quanto ci si sarebbe aspettato da un incremento lineare delle dimensioni dei sottoinsiemi.

$C_N(X)$ può anche essere espressa in termini di entropie ovvero, al pari di $I(X)$, come somma dei valori di MI .

Riprendendo la [2] si ha

$$C_N(X) = \sum [(H(X_j^k)) - (k/n)H(X)] \quad (k = 1 \div n) \quad [5]$$

Inoltre, considerando l'espressione di $H(X)$ nella [3], risulta che $C_N(X)$ corrisponde alla mutua informazione media tra le bipartizioni di X , sommate su tutte le dimensioni delle bipartizioni:

$$C_N(X) = \sum (MI(X_j^k; X - X_j^k)) \quad (k = 1 \div n/2) \quad [6]$$

Secondo la [6] risulta che $C_N(X)$ è alta quando, in media, la mutua informazione tra ogni sottoinsieme del sistema ed il complemento è alta.

Si noti anche che, rispetto alle misure di integrazione e complessità, è pienamente significativo considerare soltanto sistemi singoli.

In tali sistemi, nessuna bipartizione produce sottoinsiemi statisticamente indipendenti, ovvero:

$$MI(X_j^k; X - X_j^k) \neq 0$$

per ogni valore di j e k .

¹⁵ Gatlin L. L., *Information Theory and the Living System*, Columbia Univ. Press, New York 1972.

Ultimamente Tononi ha denotato l'informazione integrata con il simbolo Φ che compare anche nel titolo di un suo famoso e fortunato libro¹⁶. La scelta del simbolo poggia sul fatto che è possibile considerarlo come la sovrapposizione di I, che indica l'informazione, ed il carattere O, la cui circolarità indica il tutto, cioè l'unità.

4. OSSERVAZIONI E CRITICHE

Il ruolo che Tononi assegna alla complessità nella caratterizzazione della coscienza si ritrova con lievi differenze nel pensiero di Teilhard de Chardin, scienziato e gesuita, che ha elaborato una sintesi del materialismo riduzionista del neodarwinismo con il creazionismo esplicito del Disegno Intelligente.

Egli, concepisce un universo orientato, procedente per unificazioni progressive, cosciente e centrato dove tutto si evolve ed è orientato verso la maggiore complessità-coscienza in cui l'evoluzione non è più solo biologica ma anche culturale (da cui discende l'importanza dello psichico) e dove lo Spirito non si contrappone alla materia, ma ne costituisce il principio interno di organizzazione.

La materia si organizza, nel secondo principio della termodinamica, e questo aspetto che costituisce l'*esterno* delle cose è l'aspetto fenomenico della natura. Ma Teilhard vede anche un *interno*, caratterizzato dallo stato di complessità della materia, che vediamo cadere «verso l'alto in forme di organizzazione sempre più perfette»¹⁷.

Ciò vuol dire che

«la materia originaria è qualcosa di più del brulichio di particelle così meravigliosamente analizzato dalla fisica moderna»¹⁸.

Teilhard formalizza questa sua concezione dell'universo in una:

legge di complessità-coscienza

che indica la forza di unione e creazione che regge l'universo.

Per quanto attiene ai composti organici Teilhard sostiene che la vita si presenta quando la materia inorganica raggiunge un certo livello di complessità:

«Considerata nella sua interezza, nella sua totalità temporale e spaziale, la Vita rappresenta il termine di una trasformazione di grande ampiezza, durante la quale quella che chiamiamo la "materia" (nel senso più comprensivo della parola) s'inverte, si avvolge su di sé, s'interiorizza e, nei nostri confronti, l'operazione copre l'intera storia

¹⁶ G. Tononi, PHI. *Un viaggio dal cervello all'anima*, Ed. Codice, Torino 2017

¹⁷ P. Teilhard de Chardin, *Il fenomeno umano*, Queriniana, Brescia 1995, pp. 43-44; 50 ss.

¹⁸ P. Teilhard de Chardin, op. cit., p. 52.

della Terra. Il fenomeno spirituale non è dunque una specie di breve lampo nella notte, ma tradisce un passaggio graduale e sistematico dall'inconscio al cosciente, e dal cosciente all'autocosciente»

[P. Teilhard de Chardin, *Il fenomeno spirituale*, in *L'energia umana*,
Il Saggiatore, Milano 1984, p. 118.]

Sotto questo aspetto, la creazione non è mai cessata e il mondo continua ad emergere dal nulla, a partorire unità dentro la molteplicità e « *l'evoluzione esprime la capacità della materia di diventare sempre più cosciente, in modo tale che lo Spirito si libera al di sopra di essa*».

L'essenza del pensiero di Teilhard è ben espresso da Ludovico Galleni¹⁹:

*«L'evoluzione è caratterizzata dal muovere verso:
della materia verso la complessità e
della vita verso la complessità e la coscienza.»*

[L. Galleni, *Teilhard de Chardin. Un muoversi verso l'umanità?*

III Conferenza Internazionale STOQ, Pont. Univ. Gregoriana, Roma, 3.3.2009]

In altre parole, gli elementi della materia mostrano un'intrinseca tendenza ad interagire ed a organizzarsi in sistemi, dalla cui complessità emergono nuove forme dotate di *psichismi*. Lo Spirito non emergerebbe così dalla Materia (come hanno sostenuto alcuni critici di Teilhard), ma sarebbe un principio originario che opera come *unificazione del molteplice*, e di cui il livello materiale, proprio come sosteneva Leibniz, rappresenta solo una forza passiva la cui attività è mera inerzia e resistenza. Questo ci spiega una cosa molto importante, vale a dire il fatto che, per Teilhard, non può esistere materia in cui non sia attiva, fin dall'inizio, l'energia interna, o radiale, nel senso che anche la materia implica la forza di unificazione, ma ancora a livello di minima organizzazione-coscienza.

Sotto l'aspetto formale il modello IIT presenta alcune non lievi lacune dovute al fatto che la formulazione originaria di Tononi non prende in considerazione tre importanti aspetti della trasmissione dell'informazione da una sorgente ad un ricevente, e cioè:

- 1) il significato contenuto nel messaggio trasmesso dalla sorgente ed il corrispondente significato contenuto nel messaggio pervenuto al destinatario;
- 2) il sistema di codici che vengono utilizzati dal canale per veicolare il messaggio;

¹⁹ Ludovico Galleni (1947 -2016) è stato professore associato di Zoologia generale ed Etica Ambientale presso l'Università di Pisa e successivamente docente di Scienze e Teologia presso l'Istituto Superiore di Scienze Religiose "Nicolò Stenone" di Pisa. I suoi lavori sono stati in gran parte ispirati da Pierre Teilhard de Chardin.

- 3) il rumore che perturba il messaggio dovuto all'ambiente in cui il canale opera nonché le caratteristiche fisiche del canale stesso.

Il primo punto è strettamente legato alla "qualità" dell'esperienza cosciente, ossia del suo esprimersi in forme altamente differenziate:

«Cosa fa sì che l'esperienza cosciente del buio sia per l'appunto del buio, intrinsecamente diversa dall'esperienza cosciente del suono? [...] Perché mai l'attività di cellule della corteccia visiva darebbe luogo a quel particolare che [...] rende visiva l'esperienza visiva, mentre l'attività di cellule della corteccia somato-sensoriale dovrebbe dar luogo a quel particolare che [...] rende tattile l'esperienza tattile?»²⁰.

A Tononi non sfugge la forza di questa obiezione ed ammette che il modello IIT, al di là di certe affermazioni ad effetto pubblicate dai giornali²¹, possiede una portata alquanto limitata seppure, come vedremo, molto utile. Tononi così si esprime²²:

“La constatazione della soggettività dell'esperienza cosciente è stata spesso accompagnata dall'intuizione che quest'ultima è irriducibile a meri processi fisici. Quello dell'irriducibilità della coscienza è un tema dalle tradizioni filosofiche numerose quanto diverse, da Cartesio sino alla più recente ricerca fenomenologica. Per immediatezza e semplicità, peraltro, è difficile superare la presentazione datane da Thomas Nagel nell'ormai classico *Come ci si sente a essere un pipistrello*²³ (che può rendere solo approssimativamente l'inglese *What is it like to be a bat*). La tesi di Nagel è che, per quanto approfondita la nostra comprensione dei processi fisici che costituiscono un pipistrello, essa non ci darà mai il senso di come sia la sua esperienza cosciente. Ogni neuropsichiatra si è posto almeno una volta il problema analogo: “Come ci si sente, o meglio ancora, come si è, a essere il tale paziente in preda a un episodio psicotico acuto?” acuto?”. E come ci si sente a essere affetto da eminenza, afasia, anosognosia? La risposta, invariabilmente, è che ogni tentativo di descrivere lo stato soggettivo del tale paziente potrà essere più o meno accurato ma mai lo stesso che esperire direttamente, anche solo per un istante, la sua vita psichica.”

Per quanto attiene invece agli altri due punti indicati come assenti nel modello IIT di Toni, e cioè:

- il sistema di codici che vengono utilizzati dal canale per veicolare il messaggio;
- il rumore che perturba il messaggio dovuto all'ambiente in cui il canale opera nonché le caratteristiche fisiche del canale stesso.

²⁰ Giulio Tononi, *Galileo e il fotodiodo*, Laterza, Bari, 2003, p. 37

²¹ PHI, la misura della coscienza – la Repubblica, 28.01.2015
La scienza a caccia dei segreti della coscienza – ANSA, 19.10.2019

²² Giulio Tononi, *Per un modello interpretativo della mente*, Scienza e Filosofia n.3, 2010
<http://www.scienzaefilosofia.com/2018/03/25/per-un-modello-interpretativo-della-mente/>

²³ Th. Nagel, *What is it like to be a bat?*, in «Philosophical Review», 4, 1974, pp. 435-450.

si rinvia ad una eccellente e più rigorosa formulazione matematica²⁴ dovuta a J. Kleiner²⁵ e S. Tull²⁶ in cui questi importanti aspetti vengono adeguatamente trattati. Il vantaggio dell'approccio di Kleiner e Tull è che i principali concetti della IIT, compresi la causazione e l'integrazione, possono essere trattati e definiti in termini di IIT, partendo da qualunque appropriata teoria dei sistemi fisici e dei loro processi descritti mediante la teoria delle categorie che permette di trattare i processi classici o quantistici come casi particolari. Ciò rende la IIT applicabile ad una vasta classe di sistemi fisici ed aiuta a superare le attuali limitazioni presenti nel modello proposto da Tononi.

Pur con i limiti ammessi dal suo stesso autore, la IIT gode al momento di una serie numerosa di evidenze sperimentali rilevate in molti paesi del mondo. È significativa al riguardo una intervista²⁷ al prof. Marcello Massimini²⁸ che ha collaborato con Tononi, sul piano sperimentale, alla messa a punto del modello IIT.

Ci può spiegare, in sintesi, in cosa consiste la IIT e su quali evidenze sperimentali si fonda?

La teoria dell'informazione integrata affronta di petto il problema fondamentale della coscienza: quali sono le condizioni necessarie e sufficienti perché un sistema fisico abbia esperienza cosciente? La teoria parte da due osservazioni riguardanti le proprietà fondamentali dell'esperienza cosciente:

- 1) la coscienza è altamente informativa; infatti, ogniqualvolta entriamo in un particolare stato cosciente (per esempio, quando vediamo un cielo blu), escludiamo una quantità di possibili stati alternativi (di vedere rosso, giallo, buio, pioggia, di essere in una stanza, di essere in un cinema e vedere un particolare fotogramma di uno di tutti i possibili film, etc.);
- 2) la coscienza è integrata; infatti, ogni esperienza cosciente è assolutamente unitaria, non potremmo mai, per esempio, essere separatamente coscienti del campo visivo di destra e di quello di sinistra. Da queste premesse deriva l'enunciato fondamentale: "un sistema fisico è cosciente nella misura in cui è in grado di integrare informazione". Ovvero, il substrato della coscienza deve essere un sistema composto da moltissimi elementi funzionalmente diversi (informazione) che sono, tuttavia, strettamente collegati tra loro a formare un tutt'uno

²⁴ Johannes Kleiner, Sean Tull - The Mathematical Structure of Integrated Information Theory, in *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics* | www.frontiersin.org, June 2021 | Volume 6 | Article 602973

²⁵ Johannes Kleiner, Ludwig Maximilian University of Munich, Munich, Germany

²⁶ Sean Tull, Cambridge Quantum Computing Limited, Cambridge, UK

²⁷ Intervista realizzata da Marco Mozzoni il 26/01/2010 © [BRAINFACTOR](http://BRAINFACTOR.it) Cervello e Neuroscienze.

²⁸ Marcello Massimini, medico neurofisiologo, è ricercatore in Fisiologia Umana all'Università di Milano e Professore Invitato presso il Coma Science Group dell'Università di Liegi. Ha lavorato in Canada e, successivamente, con Giulio Tononi nel dipartimento di psichiatria dell'Università del Wisconsin. Sempre in collaborazione con l'Università del Wisconsin, sta attualmente mettendo a punto, in Italia, nuovi strumenti per lo studio del sonno, della coscienza e delle loro alterazioni. Su questi argomenti ha pubblicato sulle più prestigiose riviste scientifiche internazionali, fra cui *Science* e *Nature*.

indivisibile (integrazione). Ciò è tutt'altro che banale: si tratta di un delicatissimo equilibrio tra diversità e unità.

Una teoria tesa a superare i “paradossi” tradizionali del rapporto cervello-coscienza...

Questa chiave di lettura aiuta a risolvere molti paradossi riguardanti il rapporto cervello-coscienza. Per esempio, spiega perché una lesione al sistema talamo-corticale può determinare il coma mentre l'asportazione in toto del cervelletto (una struttura con ancora più neuroni e molto complicata) non ha alcun effetto sulla coscienza: mentre il primo è costituito da elementi funzionalmente molto diversi tra loro che sono, tuttavia, strettamente collegati da fibre nervose a breve e lunga distanza, il secondo ha una struttura prettamente modulare, non integrata. Analogamente, la teoria spiega perché la coscienza è ridotta durante il sonno a onde lente, malgrado il cervello rimanga molto attivo; abbiamo recentemente dimostrato che con l'addormentamento, le diverse aree che costituiscono la corteccia cerebrale rimangono attive e reattive ma perdono la capacità di comunicare efficacemente tra loro, un po' come accade al cervelletto. Viceversa, la teoria predice che durante una crisi epilettica la coscienza è abolita, non per via di un difetto di integrazione (infatti, tutti i neuroni si attivano all'unisono), ma a causa di una perdita di informazione. In questo caso, infatti, le varie aree della corteccia cerebrale perdono la loro specificità funzionale e si restringe così il repertorio di possibili stati; o tutto è attivo, o tutto è spento.

Quanto converge la IIT con le altre spiegazioni provenienti dalla neurobiologia e dalle scienze cognitive? Quali sono i suoi punti di forza?

Ci sono molte idee diverse riguardo ai substrati neurali della coscienza, ma sostanzialmente c'è chi dice che la coscienza dipende dall'attivazione di una specifica area (o meccanismo) cerebrale e chi sostiene, invece, che quello che conta è che ci sia un'attivazione diffusa di gran parte del cervello. La IIT è diversa perché sostiene che entrambe le cose (specializzazione e integrazione) sono necessarie, ma è essenzialmente diversa perché è, per il momento, l'unica teoria della coscienza. Essa, infatti, si presenta di fatto come un complesso di relazioni matematiche derivate da un piccolo insieme di principi basilari, propone una misura della coscienza, fa predizioni molto specifiche ed è pertanto falsificabile sperimentalmente.

APPENDICE

Le basi quantistiche della Scienza della Coscienza

Nella realtà quotidiana l'interpretazione dei fenomeni segue una logica binaria di derivazione aristotelica basata sul presupposto dell'esistenza di due valori contrari ed inconciliabili, a cui si applica il principio di "non contraddizione" e il suo diretto corollario: il principio del "terzo escluso".

In Meccanica Quantistica (MQ nel seguito), invece, si utilizza una logica che ammette valori intermedi attribuendo alla verità un valore probabilistico. Così, ad esempio possiamo dare un valore di 70% di verità all'affermazione "X al tempo t è in A" e il 30% di verità al postulato "X al tempo t è in B". Il valore percentuale di verità (e quindi il suo valore complementare di falsità) in MQ si chiama "ampiezza di probabilità". Lo stato di un sistema quantico, cioè l'insieme di vettori posizione e quantità di moto che contraddistingue un determinato sistema, è definito dalla funzione d'onda di Schrödinger, $\Psi(r,t)$, che integra le diverse "ampiezze di probabilità" dei vettori prima citati ed è la soluzione dell'equazione di Schrödinger:

$$-i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\mathbf{r}) \right] \Psi \quad \Psi \equiv \Psi(\mathbf{r}, t)$$

dove i è l'unità immaginaria, \hbar è la costante di Planck ridotta, m è la massa della particella, \mathbf{r} è la coordinata nello spazio tridimensionale, t è la variabile temporale, ed il modulo al quadrato della funzione d'onda $\Psi(\mathbf{r}, t)$ rappresenta la densità di probabilità che una particella si trovi nel punto \mathbf{r} al tempo t .

In MQ il concetto di "ampiezza di probabilità" è diverso da quello classico di "probabilità" in cui vale il principio di "non contraddizione" di una logica duale; in altre parole la probabilità del 70% che X sia in A e quella del 30% che A sia in B esprimono il grado di fiducia di trovare X solo in uno dei due posti (principio separazionista), e non in tutti e due contemporaneamente. L'"ampiezza di probabilità" sancisce al contrario che X è presente al 70% in A e al 30% in B, e, quindi, è contemporaneamente presente, sia pure con valori diversi, in tutti e due i posti. X è come un'onda che ha il suo apice in A (70%) e sfuma verso B (30%): il campo interessato dall'onda nella sua evoluzione si chiama "orbitale energetico", mentre il tipo d'onda che lo caratterizza (descritta dalla equazione di Schrödinger) "stato quantico".

La funzione d'onda di Schrödinger è applicabile solo a sistemi che siano in uno stato di “coerenza quantistica” cioè quando le variabili del sistema (variazione di posizione e variazione di quantità di moto) sono tali che il loro prodotto ha un valore così piccolo da avvicinarsi a quello della costante di Planck²⁹. In altre parole, se in un sistema la scala delle distanze tra i corpi è nanometrica, come avviene a livello sub-atomico, anche notevoli variazioni energetiche mantengono lo stato di “coerenza quantistica”. Viceversa, nella scala dimensionale umana (mm, cm, metri, ecc.), per mantenere lo stato di coerenza quantistica si devono applicare variazioni di quantità di moto ultramicroscopiche. In queste condizioni la perdita dello stato di coerenza quantistica si chiama “collasso della funzione d'onda”. Così accade che delle varie possibilità se ne percepisce una sola alla volta.

Quindi, nella scala dimensionale umana sono le ampie fluttuazioni energetiche che non permettono l'applicazione della funzione d'onda di Schrödinger: calore, disturbi elettromagnetici, urti meccanici e così via. *Ma insieme a tutte queste grandezze ve ne è un'altra che può provocare un collasso quantistico: l'osservazione cosciente.*

In effetti se una particella X è descritta da un vettore di posizione e di quantità di moto le sue traiettorie sono definite dalla funzione d'onda di Schrödinger. L'evoluzione nel tempo di tale funzione porta come risultato ad un'altra sovrapposizione di stati: X in A o X in B. Quando un osservatore decide di rilevare la traiettoria di X, in quel momento si decide la posizione di X. Infatti, l'atto dell'osservazione cosciente farà collassare la funzione d'onda; delle varie possibilità una sola si manifesterà. Se si manifesterà la traiettoria 1, X sarà in A; se, invece, si manifesterà la traiettoria 2, X sarà in B. Questo fenomeno ha avuto conferma in diverse verifiche sperimentali. Infatti, è stato dimostrato che l'osservazione cosciente è causa sufficiente, anche se non necessaria, perché si verifichi un collasso quantistico.

Quindi, in MQ, l'osservatore cosciente:

- 1) Fa collassare la funzione d'onda, facendo palesare una sola possibilità tra quelle presenti in sovrapposizione di stati.
- 2) Condiziona l'esito di ciò che va a verificare.

La prima caratteristica ci fa comprendere come la nostra attività mentale, almeno così come si presenta nello stato ordinario di coscienza, sia paragonabile a un elemento di disturbo nella percezione della realtà; sempre che consideriamo più vicino alla realtà il mondo che si presenta in sovrapposizione di stati.

²⁹ $h = \text{Costante di Planck} = 6.626 \times 10^{-31} \text{ g m}^2 \text{ s}^{-1} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ g m}^2 \text{ s}^{-1}$

La seconda caratteristica dimostra invece la profonda interconnessione tra soggetto che osserva ed oggetto osservato.

Quindi, in un certo senso possiamo concludere che l'interconnessione soggetto/oggetto provoca un collasso quantistico della funzione d'onda perché l'attività mentale "disturba" lo stato di coerenza quantistica dell'oggetto osservato.

Possiamo quindi affermare che gli stati mentali sono interconnessi con gli eventi quantistici osservati dalla coscienza. Quindi, se un evento quantistico è osservato da una persona, la funzione d'onda di quell'evento collasserà attraverso il collasso dello stato mentale di quella persona; questo collasso sarà registrato nell'EEG dell'osservatore. Infatti, diversi esperimenti hanno dimostrato che l'EEG ottenuto con la metodica ERP (Event Related Potential) in chi osservava un oggetto mai osservato prima, e quindi mai collassato, era diverso da tutti gli altri³⁰; in un contesto quantistico non ha senso specificare se sia il collasso a livello cerebrale a determinare il collasso nel mondo esterno, o viceversa, in quanto in esso vige il principio di sincronicità e non di causalità. In effetti, le due affermazioni sono equivalenti.

In conclusione, dato che il fenomeno è condizionato dall'osservatore, come la propria immagine riflessa su uno specchio si modifica movendosi, così possiamo ragionevolmente concludere che le ampie fluttuazioni energetiche che si rilevano all'esterno sono espressione di fluttuazioni energetiche che avvengono a livello cerebrale, così come il collasso quantistico che avviene "fuori" è sincrono con il collasso quantistico che avviene "dentro" il cervello.

Quindi sincronizzando e rendendo coerente l'attività cerebrale sarà possibile "osservare" la realtà esterna senza perturbarla, in uno stato di "sovrapposizione di stati".

La connessione tra MQ e Coscienza costituisce, come ben si può immaginare, un affascinante campo di ricerca sul quale si concentrano molti interessi e molte energie. Per dare un'idea della portata di questo fenomeno, elenchiamo qui brevemente, in ordine cronologico a partire dall'anno 1924, i modelli quantistici della coscienza rinvenuti in letteratura. L'elenco attinge in larga misura ad un articolo di Antonella Vanini³¹ al quale si rimanda per gli approfondimenti del caso.

1. Il modello di Alfred Lotka: la costante di Planck come linea di confine tra mondo oggettivo e mondo soggettivo (1924). [Lotka A.J., *Elements of Mathematical Biology*, Dover Publications, New York, 1924];
2. Il modello di Niels Bohr: la coscienza crea la realtà attraverso il collasso della funzione

³⁰ Mark Germine, *Experimental Model for Collapse of the Quantum Wavefunction* - <http://www.goertzel.org/dynapsyc/1998/collapse.html>

³¹ Antonella Vanini, *Modelli Quantistici della Coscienza*, in Sintropia 2007, 1, pp. 29-48 ISSN 1825-7968

- d'onda (1930). [Bohr, Heisemberg. *Interpretazione di Copenhagen*, 1927];
3. Il modello di Lugi Fantappiè: onde anticipate e coscienza (1941). [L. Fantappiè, *Principi di una teoria unitaria del mondo fisico e biologico*, Di Renzo Editore, Roma, 1991];
 4. Il modello di David Bohm: l'ordine implicato (1950). [D. Bohm, *Wholeness and the implicate order*, Routledge, Oxford, 1980];
 5. Il modello di Herbert Fršhlich: l'ordine dei condensati di Bose-Einstein (1968). [Fršhlich H., *Long range coherence and energy stororage in biological sistemas*, Int. J. Quantum Chemistry 1968, 2:641-649];
 6. Il modello di Evan Walker: il tunneling sinaptico (1970). [Walker E., *The Nature of Consciousness*, Mathematical BioSciences 7, 131—178, 1970];
 7. Il modello di Umezawa e Ricciardi: Quantum Field Theory e Quantum Brain Dynamics (1980). [Ricciardi, L.M. e Umezawa, H., *Brain and physics of many body problems*, Biological Cibernetics, Vol. 4, N. 2, pp. 44-48, Springer, Berlin 1967];
 8. Il modello di John Carew Eccles: gli psiconi (1986). [Eccles J., *The self and its brain*, Springer, Berlin, 1994];
 9. Il modello di Nick Herbert: la coscienza pervasiva (1987). [Herbert N., *Quantum Reality: Beyond the New Physics*, American Journal of Physics, May 1987, 55(5):478-479]
 10. Il modello James Culbertson: lo psicospazio (1987). [Culbertson J., *Sensations, memories and the flow of time*, Cromwell Press, Trowbridge, UK, 1976];
 11. Il modello di Ian Marshall: Quantum Self Theory (1989). [Marshall, I.N., *Consciousness and Bose-Einstein Condensates*, New Ideas in Psychology 1989, 7, 73-85];
 12. Il modello di Michael Lockwood: l'interpretazione "Many Minds" (1989). [Lockwood M., *Mind, brain and the quantum*, Basil Blackwell, Oxford, 1989];
 13. Il modello di Roger Penrose e Stuart Hameroff: ORCH-OR, Orchestrated Objective Reduction (1989). [Hameroff S., *Quantum computation in brain microtubules: the Penrose-Hameroff model of consciousness*, Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1998, 356:1869-1896];
 14. Il modello di Chris King: Supercausalità e coscienza (1989). [King C.C., *Dual-Time Supercausality*, Physics Essays, 1989, 2(2):128-151];
 15. Il modello di Matti Pitkšnen: TGD, Topological Geometro Dynamics (1990). [Pitkšnen M., *TGD (Topological Geometro Dynamics) Inspired Theory of Consciousness*,

- NeuroQuantology, March 2003, Vol. 1, Issue 1: 68-93];
16. Il modello di Karl Pribram: Modello Olonomico della mente (1991). [Pribram K., *Brain and Perception*, Lawrence Erlbaum, Oxford, 1990];
 17. Il modello di Henry Stapp, Quantum State Reduction and Conscious Acts (1993). [Stapp H.P., *Mind Matter and Quantum Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin, 1993];
 18. Il modello di Kunio Yasue: Quantum Brain Dynamics (1995). [Jibu, M., Yasue, K., *Quantum brain dynamics and consciousness*, in *Advances in Consciousness Research*, Vol.3, John Benjamins Publishing Company, Amsterdam, 1995];
 19. Il modello di Giuseppe Vitiello: modello dissipativo della coscienza (1995). [Vitiello G., *Quantum Dissipation and Informazione. A route to consciousness modelling*, NeuroQuantology, June 2003, Vol. 1, Issue 2:266-279];
 20. Il modello di Alex Kaivarainen: modello gerarchico della coscienza (1996). [Kaivarainen A., *Hierarchic Model of Consciousness*, NeuroQuantology, September 2005, Vol. 3(3):180-219];
 21. Il modello di Massimo Bondi: giunzioni sinaptiche e coscienza (1998). [Bondi M., *Quantum Electrodynamics and Unified Synaptic Channel in the identification of Consciousness*, NeuroQuantology, June 2005, Vol. 3(2): 119-133];
 22. Il modello di Huping Hu: la coscienza mediata dallo spin (2002). [Hu H., Wu M., *Spin as Primordial Self-Referential Process Driving Quantum mechanics, Spacetime Dynamics and Consciousness*, NeuroQuantology, March 2004, Vol. 2 (1):41-49];