

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/336967746>

"La coscienza nella Teoria dell'Informazione Integrata: una prospettiva relativistica"

Thesis · September 2018

DOI: 10.13140/RG.2.2.25756.23682

CITATIONS

0

READS

2,149

3 authors:



Gianluca Marzola

University of North Carolina at Wilmington

10 PUBLICATIONS 3 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Alfredo Brancucci

Università degli Studi "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara

117 PUBLICATIONS 2,254 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Piero Di Carlo

Università degli Studi G. d'Annunzio Chieti e Pescara

138 PUBLICATIONS 3,042 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



memory and elders [View project](#)



BORTAS - quantifying the impact of BOREal forest fires on Tropospheric oxidants over the Atlantic using Aircraft and Satellites [View project](#)



Università degli Studi G. D'Annunzio

Chieti – Pescara

Scuola di Medicina e Scienze della Salute

Dipartimento di Scienze Psicologiche, della Salute e del Territorio

Corso di Laurea Magistrale in Psicologia Clinica e della Salute

*“La coscienza nella Teoria dell’Informazione
Integrata: una prospettiva relativistica”*

Candidato: *Gianluca Marzola*

Matricola n°3177332

Relatore:

Chiar.mo Prof. Alfredo Brancucci

Correlatore:

Chiar.mo Prof. Piero Di Carlo

Anno accademico 2017/2018

INDICE

INTRODUZIONE.....	2
1. LA COSCIENZA E I SUOI CORRELATI NEURALI.....	5
1.1 Dentro la scatola cranica.....	5
1.2 Gli stati di coscienza.....	9
1.3 Individuare gli stati di coscienza.....	11
2. LA TEORIA DELL'INFORMAZIONE INTEGRATA E I SUOI POSTULATI	16
2.1 <i>Esistenza</i>	17
2.2 <i>Composizione</i>	19
2.3 <i>Informazione</i>	22
2.4 <i>Integrazione</i>	27
2.5 <i>Esclusione</i>	31
3. LO SPAZIO-TEMPO	35
3.1 <i>Tempo assoluto e tempo relativo</i>	35
3.2 <i>La teoria della relatività ristretta</i>	39
4. UNA COSCIENZA RELATIVISTICA: UNO SGUARDO OLTRE LA SCATOLA CRANICA	45
4.1 <i>La coscienza all'interno dello spazio tempo: una prospettiva relativistica</i>	45
4.2 <i>La coscienza nell'unità di tempo: un ϕ relativo?</i>	48
CONCLUSIONI.....	59
BIBLIOGRAFIA.....	62

INTRODUZIONE

Esistono due grandi misteri tuttora irrisolti ai quali l'essere umano cerca di rispondere da secoli: il primo si riferisce alla nascita dell'universo; il secondo, invece, riguarda l'esperienza cosciente e, in particolare, il modo in cui qualcosa di materiale possa produrre il pensiero.

La Fisica sta facendo enormi passi in avanti nella spiegazione del primo quesito, utilizzando la matematica, i dati empirici, le tecnologie e, più in generale, il metodo scientifico. Tale metodo conoscitivo ha ampliato la concezione del nostro universo fin dai tempi di Galileo e ha consentito il progresso scientifico e tecnologico tuttora in atto.

Per quanto riguarda la spiegazione dell'esperienza cosciente, la situazione sembra essere meno definita. Per molti anni, infatti, l'idea che la coscienza non potesse essere oggetto di ricerche scientifiche è stata predominante. Per secoli il problema della coscienza è stato trattato esclusivamente dalla filosofia e dalla religione. Solo negli ultimi decenni, l'evoluzione delle neuroscienze, ha consentito l'adozione di un approccio più scientifico a tale argomento.

Il problema di fondo, nello studio della coscienza, sembra essere di tipo metodologico. Mentre nello studio di fenomeni fisici abbiamo un essere cosciente (l'essere umano) che adotta un metodo scientifico per spiegare un fenomeno naturale, nello studio della coscienza la situazione diventa più complessa. In questo caso, infatti, la coscienza cerca di studiare la coscienza stessa. Nessun altro elemento dell'universo sembra comportarsi in modo analogo (porsi nelle condizioni di comprendere se stesso).

Il problema dell'approccio alla spiegazione della coscienza sembra risiedere nella struttura del metodo scientifico, il quale tende a separare l'osservatore dall'oggetto di studio. Tale separazione è 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.

Anche la Fisica quantistica, nel corso degli anni, si è trovata a dover rivedere le basi del metodo scientifico, poiché in alcuni esperimenti (come, ad esempio, quello delle due

fenditure -Joshua Kincaid, 2016-) i risultati sembrano essere influenzati dal processo osservativo. Si passa, dunque, da una concezione oggettiva e immutabile dei fenomeni che sembrano indipendenti dall'osservatore, a una concezione più dinamica, che vede non solo l'osservatore interconnesso con il fenomeno osservato, ma perfino i risultati interdipendenti dall'osservazione cosciente.

Un altro problema nello studio della coscienza risiede nella difficoltà di comprendere la relazione che la interconnette alle forze dell'universo. Le neuroscienze hanno raggiunto una conoscenza profonda dei processi cerebrali. Si è, infatti, in grado di attribuire, con una distinta precisione, quali attività cerebrali sono associate a determinate funzioni cognitive, tuttavia non si può ancora comprenderne il perché. Mentre la Fisica mette in relazione le forze e gli elementi conosciuti per creare un quadro più ampio della situazione, la coscienza non è mai stata messa in relazione con qualcosa che vada oltre le localizzazioni cerebrali e le funzioni corporee. In altre parole sembra che gli studi sulla coscienza non vogliano allontanarsi dalla scatola cranica.

L'accostamento della coscienza ai fondamenti universali finora conosciuti, potrebbe rappresentare una possibilità (sebbene non immediatamente intuitiva) di ampliare la nostra comprensione. Anche se la coscienza sembra avere delle caratteristiche totalmente differenti dalle forze conosciute in natura, è, tuttavia, innegabile che essa sia connessa alle proprietà strutturali della Materia e che avvenga all'interno di uno Spazio e di un Tempo.

La Teoria dell'Informazione Integrata di Giulio Tononi è uno degli studi più promettenti sul fenomeno della coscienza. Essa è sostenuta da un modello matematico, che consente di misurare la coscienza, partendo dalle proprietà materiali del cervello e considerando il modo in cui sono interconnessi i neuroni. Tononi è stato uno dei primi a uscire dalla scatola cranica, trattando la coscienza non solo come un'espressione del funzionamento cerebrale, ma anche come una particolare modalità con la quale sono organizzate le informazioni, formando un insieme il cui risultato è superiore alla somma delle singole parti che formano un sistema.

L'obiettivo che si prefigge questa tesi è di mettere in relazione la Teoria dell'Informazione Integrata di Tononi con le basilari nozioni di Spazio e di Tempo

riscontrabili nella Teoria della Relatività. A tale scopo saranno utilizzate delle formule della Teoria della Relatività descritte da Daniel Styer (professore dell'Oberlin College dell'Ohio) nel suo libro "Comprendere davvero la Teoria della Relatività" derivanti dalle trasformazioni di Lorentz.

Lo scopo è comprendere in che modo la coscienza si relaziona con lo Spazio e con il Tempo e se esistono delle condizioni limite di esistenza della coscienza all'interno dell'universo. Inoltre, si cercherà di comprendere se i livelli di coscienza dipendono esclusivamente da proprietà intrinseche della materia che prescindono lo spazio-tempo, o se la velocità alla quale viaggia la materia nello spazio-tempo modifica le caratteristiche della coscienza. In altre parole, i livelli di coscienza potrebbero dipendere dalla velocità alla quale viaggia un sistema in grado di generare coscienza. Ciò comporterebbe una concezione relativistica della coscienza, la cui connessione con le strutture cerebrali (ormai ampiamente dimostrata) la pone nella condizione di essere così collegata alla materia da essere sottoposta alle leggi della relatività. L'obiettivo è, dunque, comprendere la funzione della coscienza all'interno di un contesto più ampio, al fine di affrontare un problema tanto complesso con una visione più olistica. Non una psicologia intesa "come galassia", come la presenta in chiave metaforica Fulcheri (Fulcheri, 2005), ma una coscienza realmente connessa all'intera struttura dell'universo, fin dai fondamenti più profondi di Spazio e di Tempo.

1. LA COSCIENZA E I SUOI CORRELATI NEURALI

1.1 Dentro la scatola cranica

Applicare un approccio scientifico alla coscienza si rivela tuttora complicato, anche alla luce del fatto che non esiste una definizione univoca della parola “coscienza”. Prima di proseguire la discussione sull’argomento è importante chiarire il significato di questa parola, che può rivelarsi fonte di dubbio e d’incertezze. La parola ‘coscienza’ deriva dal latino *conscire* che significa “essere consapevoli”, conoscere. Va distinta, però, la coscienza intesa in senso religioso, come insieme di norme morali, con un potere pseudo punitivo, che indirizzano la persona verso la “retta via” (rendendola “coscienziosa” e responsabile), dalla *coscienza* utilizzata nell’ambito delle neuroscienze. Nell’ambito psicologico-scientifico è ormai opinione comune, intendere il fenomeno della coscienza come “quella cosa che svanisce quando ci addormentiamo in un sonno senza sogni (o siamo in uno stato di coma o sotto anestesia) e che riappare quando ci svegliamo o quando sogniamo”. La coscienza racchiude tutto ciò di cui facciamo esperienza. Senza la coscienza non esisterebbe ciò che siamo, ciò che abbiamo e ciò di cui facciamo esperienza. Ad esempio, se un albero cade in un luogo in cui non c’è nessuno ad ascoltare, non produce suoni o rumori, poiché, questi, sono il risultato della percezione della coscienza, la quale trasforma le vibrazioni delle onde sonore in un suono. Un albero, cadendo, produce delle vibrazioni, ma se queste non sono incanalate all’interno di un sistema uditivo ed elaborate da un sistema cosciente, non diventeranno un suono. Se non ci fosse la coscienza, non esisterebbero suoni, ma solo vibrazioni. Il suono deriva dalla percezione delle vibrazioni che sono incanalate nel sistema nervoso per mezzo delle orecchie; il cervello elabora le vibrazioni e integra le informazioni derivanti da queste al fine di renderle “leggibili”, costruendo, così, ciò che noi definiamo “suono”. In altre parole, il suono esiste solo all’interno della dimensione mentale. Il filosofo inglese Alan W. Watts espone questo concetto in chiave più metafisica: *“Attraverso i nostri occhi, l’universo percepisce se stesso. Attraverso le nostre orecchie, l’universo ascolta le sue armonie. Siamo i testimoni attraverso cui l’universo diventa cosciente della sua gloria, del suo splendore”*. Allo stesso modo l’astrofisico naturalista Hubert Reeves suggerisce che *“l’universo è una macchina per*

fare coscienza”. La coscienza è, dunque, l’occhio per mezzo del quale l’universo guarda se stesso.

Le neuroscienze, attraverso sistemi di neuroimaging, collocano questo “occhio” all’interno dei cosiddetti “*correlati neurali della coscienza*” (NCC). I NCC sono quelle porzioni del cervello che sembrano essere funzionalmente collegate all’esperienza cosciente. Ciò è deducibile partendo dal fatto che queste aree sono più attive, rispetto ad altre, quando è in atto un’esperienza cosciente e, inoltre, il loro danneggiamento comporta un’inevitabile perdita dello stato cosciente. “*Un correlato neurale della coscienza è uno specifico pattern di attività cerebrale che correla con particolari esperienze cosce. Non è chiaro come un processo fisico, come l’attività neurale, possa dar luogo a un fenomeno soggettivo come la consapevolezza*”. (G.Rees, G.Kreiman, & C.Koch, 2002).

Vanno distinti i “NCC completi” dai “NCC contenuto-specifico” e dalle “condizioni di sfondo”. (C.Koch, 2016)

I *NCC completi* (Full NCC) si riferiscono al substrato che supporta l’esperienza generale, indipendentemente dal suo contenuto. I *NCC contenuto-specifico* (content-specific NCC) invece, si riferiscono al substrato neurale che supporta un particolare contenuto dell’esperienza, come ad esempio volti visti, sognati o immaginati. Infine, le *condizioni di sfondo* (background condition) sono quei fattori che permettono la coscienza, ma senza contribuire direttamente all’esperienza, come ad esempio i sistemi di eccitazione che garantiscono un adeguato arousal ai NCC, oppure adeguati livelli di glucosio e ossigeno. (C.Koch, 2016)

Per far sì che un insieme di neuroni sia considerato come un NCC contenuto-specifico, è necessario che a una stimolazione di questi, corrisponda una determinata esperienza, anche in assenza di stimoli esterni che possano causare quell’esperienza. Ciò significa che quando i NCC contenuto-specifico, ad esempio, per la percezione dei volti, sono stimolati artificialmente, mediante stimolazione magnetica transcranica (TSM), il partecipante deve vedere una faccia, pur non essendo presente nel suo campo visivo. Se, invece, l’attività di quest’area è bloccata, il partecipante non dovrebbe essere in grado di vedere nessun volto, anche se presente. L’individuazione dei NCC contenuto-specifico,

ad esempio di un volto, è possibile confrontando l'attività neurale registrata durante la percezione di un viso, con l'attività neurale senza la sua percezione, mantenendo lo stato generale del partecipante costante in entrambe le circostanze. (C.Koch, 2016)

Per comprendere maggiormente il concetto di NCC può essere particolarmente utile partire dalla differenza tra la corteccia cerebrale e il cervelletto.

“Il cervelletto ha quattro volte più neuroni della corteccia cerebrale” (Herculano-Houzel, 2012) tuttavia *“lesioni del cervelletto hanno scarsi effetti sulla coscienza”*. (Lemon, 2012)

Sembra ormai opinione comune che nel cervello ci siano circa 100 miliardi di neuroni (anche se la Dr.ssa Suzana Herculano-Houzel et al. in Brasile, ha compiuto una stima di circa 86 miliardi nel 2009). Di questi 100 miliardi, approssimativamente 20 sono nella corteccia cerebrale, mentre i restanti 80 miliardi sono all'interno del cervelletto. Il fatto che una lesione al cervelletto (o addirittura l'asportazione dello stesso) comporti effetti trascurabili sull'esperienza cosciente, rispetto a una lesione della corteccia cerebrale che, invece, può causare la perdita o la diminuzione della coscienza, sembra rappresentare un paradosso, poiché ciò significa che un individuo potrebbe rimanere cosciente con soli 20 miliardi di neuroni, ma restare incosciente pur conservandone 80 miliardi. La soluzione a tale paradosso sembra essere nella Teoria dell'Informazione Integrata di Tononi, secondo cui *“Un sistema fisico è cosciente nella misura in cui è in grado di integrare informazioni”*. (G.Tononi, 2013) Ne deriva che non è il numero di neuroni a determinare lo sviluppo della coscienza, bensì il modo in cui questi si organizzano al fine di integrare informazioni. *“Non solo nel cervelletto manca un corpo calloso che legghi i due emisferi cerebrali, ma mancano anche le connessioni tra le diverse zone dei singoli emisferi. Presto ci rendiamo conto che il cervelletto si compone di moduli indipendenti.[...] Gli impulsi elettrici vengono elaborati localmente nel piccolo circuito del modulo in cui sono entrati.”* (G.Tononi, 2013)

La struttura anatomico-funzionale del cervelletto si rivela, dunque, inappropriata all'integrazione dell'informazione, poiché la divisione in moduli che lavorano in parallelo, senza interagire tra loro, non consente l'integrazione necessaria per lo

sviluppo della coscienza. Ciò che fa la differenza non è il numero di neuroni, bensì la quantità e la qualità delle interazioni che avvengono tra le varie parti di un sistema.

Una volta assodato che la coscienza non è generata dal cervelletto, i neuroscienziati hanno esaminato la corteccia cerebrale, al fine di verificare quali aree della corteccia fossero funzionalmente correlate all'esperienza cosciente. Diversi studi sembrano confermare che il sistema talamo-corticale sia la struttura maggiormente connessa all'esperienza cosciente. *“Nel sistema talamo-corticale, oltre a un corpo calloso, ci sono molti fasci di fibre che connettono aree anche lontanissime tra loro. Queste fibre attraversano ciascun emisfero in lungo e in largo, dal basso verso l'alto e dall'alto verso il basso. [...] Mettono in rapidissima comunicazione i gruppi neuronali del lobo occipitale con quelli del lobo frontale e quelli frontali con quelli parietali. E lungo tutte queste vie corrono velocissimi gli impulsi nervosi”.* (G.Tononi, 2013)

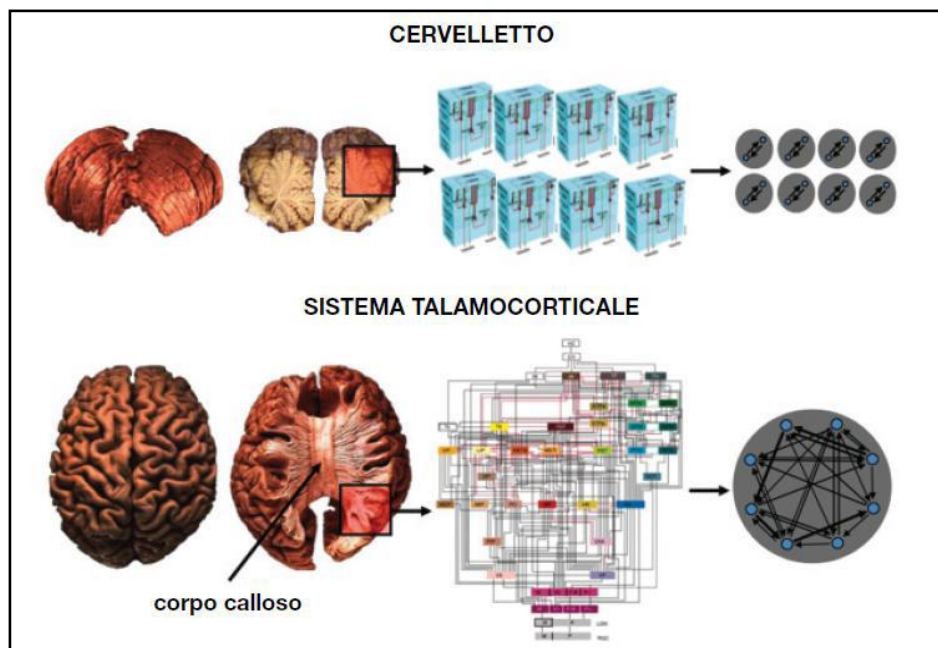


Figura 1. Differenza tra cervello e cervelletto

L'architettura del sistema talamo-corticale sembra, dunque, compatibile con la formazione della coscienza, grazie alla sua fitta rete di connessioni che consente un'integrazione d'informazioni molto superiore rispetto a quella generata dal sistema

cerebellare. Alcuni esperimenti hanno evidenziato una cosiddetta “zona calda” per lo sviluppo della coscienza, individuabile in una regione posteriore della corteccia cerebrale. *“Tali esperimenti indicano che, sia nel sonno REM sia nel sonno NREM, l'intero NCC sembra essere localizzato in una regione temporo-parieto-occipitale, associata a esperienze percettive, e in una regione frontale associata a esperienze simili al pensiero”*. (Siclari, 2014)

Esistono, tuttavia, dei dubbi riguardo al ruolo della corteccia frontale nello sviluppo della coscienza, infatti, anche se *“studi di neuroimaging [...] indicano che c'è una ridotta attività nella corteccia fronto-parietale durante la perdita di coscienza, suggerendo che questa sia candidata come NCC, altri risultati sembrano contraddire tale risultato”* (C.Koch, 2016). A entrare in contrasto con questi risultati sono gli studi sul sonno e sui sogni che evidenziano una ridotta attività della corteccia prefrontale durante la fase REM del sonno, mentre i partecipanti sognano vividamente. (Nir, 2010) Siccome il sogno è considerato come una forma di coscienza, induce perplessità il fatto che la corteccia frontale non sia attiva durante il suo svolgimento. Nonostante ciò, la sua attivazione potrebbe comunque rappresentare la differenza sostanziale tra lo stato cosciente che si esperisce durante la veglia e quello che si attua durante il sogno.

Lo studio dei NCC è il più utilizzato nella comprensione scientifica dell'esperienza cosciente, poiché ci pone nella condizione di poter individuare in tempo reale l'attività cerebrale, nonché di poter dare una forma concreta e un corrispettivo tangibile al fenomeno elusivo della coscienza.

1.2 Gli stati di coscienza

Anche se, il più delle volte, ci si riferisce alla *coscienza* come derivante dal funzionamento ottimale di un sistema cerebrale, in ambito clinico si è giunti, nel corso del tempo, a parlare di differenti stati di coscienza, in base alle diverse conformazioni che essa assume in relazione a lesioni cerebrali. La concezione della coscienza si è evoluta di pari passo con le varie tecnologie applicate all'ambito clinico, come la respirazione artificiale: *“se la respirazione artificiale ha reso la linea tra la vita e la*

morte assai più definita, essa ha irrimediabilmente confuso i confini della coscienza” (Tononi, 2013). Numerose persone con danni cerebrali importanti, infatti, riescono a essere tenute in vita con l’ausilio di strumentazioni tecnologiche combinate a farmaci.

Possiamo distinguere differenti stati di coscienza:

Lo stato di coma;

lo stato vegetativo;

lo stato di locked-in;

lo stato minimamente cosciente.

Lo stato di coma è uno stato simile al sonno profondo all’interno del quale il paziente non risulta cosciente. Solitamente è dovuto a un danneggiamento del tronco encefalico, il quale si occupa di regolare molte funzioni vitali di base come la respirazione, il battito cardiaco o gli stati di sonno e di veglia. La fine dello stato di coma, se il soggetto non muore, è segnata dall’apertura degli occhi e dal recupero del ciclo sonno-veglia. Infatti, tutte le mattine, al risveglio, la parte superiore del tronco dell’encefalo (costituita dal ponte e dal mesencefalo) funge da interruttore per riattivare l’intera esperienza cosciente, consentendo alle aree superiori di integrare informazioni. Nel caso di pazienti con grandi danni cerebrali, è possibile che gli occhi si aprano solo perché il tronco encefalico ha recuperato le sue funzioni di base, senza però che le aree talamo-corticali superiori (volte alla generazione della coscienza) riescano a integrare informazioni. *“Perché il risveglio sia accompagnato dalla ricomparsa di un soggetto che sente e che vede, non basta il recupero delle funzioni tronco-encefaliche, devono funzionare anche tutte le strutture più evolute che stanno sopra: quelle che per qualche ragione misteriosa generano la luce della coscienza”*(Tononi, 2013).

Quando il soggetto recupera le funzioni del tronco encefalico e i cicli di sonno-veglia, si giunge allo *stato vegetativo* in cui il paziente è in uno stato di “vigilanza senza coscienza” (apre gli occhi senza vedere). La respirazione (gestita dalle strutture inferiori del tronco encefalico e in particolare dal *bulbo*) è conservata, ma il paziente *“non dà alcun segno di sé, nessuna risposta a ordini semplici, nessuna reazione localizzata a stimoli dolorosi (...) per contro si può osservare una gamma estesa di gesti automatici*

non intensionali e senza significato: movimento degli occhi, movimenti riflessi degli arti, del collo, smorfie, masticazione, vocalizzazioni, riso o pianti automatici” (Tononi, 2013). Lo stato vegetativo è distinguibile dal coma poiché il paziente appare “sveglio” tuttavia non cosciente.

Altri pazienti, invece, in seguito al coma recuperano pienamente la coscienza, ma rimangono paralizzati. Ciò non consente di rendersi conto immediatamente del loro recupero. Un danno in una zona del tronco dell’encefalo attraversata da migliaia di fibre nervose che collegano la corteccia cerebrale al midollo spinale, impedisce al paziente di muoversi, nonostante abbia recuperato coscienza. In questo caso bisogna parlare di pazienti “*locked-in*” ossia “chiusi dentro”. Infatti, essi si trovano intrappolati nel proprio corpo, in molti casi, senza che nessuno se ne accorga. “*I pazienti locked-in, non di rado, sono erroneamente diagnosticati come pazienti in stato vegetativo*” (Tononi, 2013). Buona parte di questi pazienti, spesso, recupera la capacità di muovere gli occhi verso l’alto e verso il basso e può imparare a utilizzare i movimenti oculari per comunicazioni basilari, che, con il tempo, possono diventare più efficienti grazie all’ausilio di computer che permettono di scegliere lettere dell’alfabeto per comporre parole. Quando, invece, anche il movimento degli occhi è impedito si parla di “*total locked-in syndrome*” e diventa più difficile riconoscere lo stato cosciente del paziente.

Un’ultima condizione che si colloca tra lo stato di locked-in e lo stato vegetativo è stata riconosciuta nel 2002 sotto il nome di “stato di coscienza minima”, che riguarda una condizione in cui i pazienti non sono in grado di comunicare, ma mostrano, occasionalmente, segni di attività motoria non automatica. Tali segni di attività variano molto da un giorno all’altro e sono difficili da individuare. “*Un esempio è il paziente che, nel contesto di uno stato generale di non responsività, di tanto in tanto fissa e segue con lo sguardo pazienti e medici che entrano nella stanza*” (Tononi, 2013).

1.3 Individuare gli stati di coscienza

Nel corso del tempo, la ridefinizione e la categorizzazione degli stati coscienti ha portato l’esigenza di indagare su vari livelli la presenza di coscienza nei pazienti.

Il *primo livello*, spesso utilizzato dai medici per valutare lo stato di coscienza dei pazienti, utilizza il comportamento del soggetto come misura del livello di coscienza. Si utilizzano scale standardizzate che prevedono un punteggio; quanto più è alto il punteggio, tanto più si riterrà elevato lo stato di coscienza. “*Un paziente è tanto più cosciente quanto più specifiche ed elaborate sono le risposte che produce*” (Tononi, 2013). Una delle scale più efficienti è la CRS-R (*Coma Recovery Scale-Revised*).

Tuttavia, utilizzando tale livello d’investigazione, non è possibile individuare pazienti coscienti che non riescono a muoversi. Considerando che la coscienza può esserci anche quando il paziente è paralizzato, si è sentita l’esigenza di approfondire i livelli di valutazione.

Il *secondo livello* cerca di andare oltre quello comportamentale, valutando direttamente l’attività cerebrale del paziente attraverso la risonanza magnetica funzionale (fMRI), uno strumento che registra il consumo di ossigeno dei neuroni. Infatti, quanto più ossigeno i neuroni consumano, tanto più elevato sarà l’afflusso sanguigno richiesto e, conseguentemente, l’attività cerebrale di quelle aree. Attualmente si è in grado di determinare quali aree cerebrali si occupano di specifiche attività e ciò è di grande aiuto per comprendere cosa il soggetto sta pensando, anche se non è in grado di comunicarlo direttamente.

Nel 2005 a una ragazza di 23 anni, in seguito ad un trauma cranico, venne diagnosticato uno stato vegetativo. Alcuni scienziati dell’Università di Cambridge, guidati da Adrian Owen, sottoposero la ragazza a un esperimento. La ragazza era immobile, ma attraverso la fMRI potevano valutare lo stato di attivazione dei suoi neuroni. Chiedendo a questa ragazza di immaginare di giocare a tennis, evidenziarono un’attività della corteccia premotoria. Chiedendo, invece, di immaginare di muoversi nella propria casa, la fMRI registrò un’attivazione nelle aree più posteriori e più profonde (proprio come accadeva nei soggetti sani) (Owen A., 2006). Questo esperimento ha evidenziato come molte diagnosi di stato vegetativo, in realtà, non siano esatte, ma nascondano, anzi, pazienti coscienti intrappolati in corpi che non consentono una comunicazione. Tale esperimento è stato eseguito su molti pazienti che avevano ricevuto diagnosi di stato vegetativo e, in circa un quinto di essi, era possibile individuare un determinato funzionamento cerebrale in relazione alle domande effettuate. Ciò non significa necessariamente che un

quarto di essi è in stato vegetativo, ma potrebbe anche significare che alcuni abbiano danni cerebrali che impediscono la comprensione del linguaggio (afasia). Inoltre, anche se tutti i sensi dovessero essere fuori uso, ciò non comporterebbe necessariamente un'assenza di coscienza. In altre parole, come afferma Tononi: "l'assenza della prova non costituisce la prova dell'assenza".

Il *terzo livello*, invece, è il più profondo, ma anche il più difficile da mettere in atto. Se il soggetto avesse perso tutti i sensi, sarebbe impossibile comunicare con lui e registrare la sua attività cerebrale in risposta a degli stimoli. In questo caso, è necessario comprendere se i correlati neurali della coscienza (NCC), ossia quelle aree la cui attività è collegata allo stato cosciente, funzionano in modo adeguato. Finora i risultati sono stati deludenti, poiché si sono basati sulla valutazione della sincronizzazione del funzionamento neuronale, il quale, tuttavia, non correla sempre con l'esperienza cosciente.

Se, però utilizziamo la Teoria dell'Informazione Integrata, secondo cui la coscienza deriva dall'integrazione d'informazioni e da elevati livelli di differenziazione (ossia dalla complessità di risposta) possiamo valutare se un paziente è cosciente comprendendo se, nel suo cervello, l'attività cerebrale è integrata e differenziata.

Quando i geologi devono studiare le profondità di un terreno sconosciuto, per prima cosa lo perturbano con una massa percuotente e registrano la risposta delle onde che rimbalzano e che tornano in superficie con dei geofoni. Allo stesso modo, si può perturbare il cervello con una stimolazione magnetica transcranica (TMS) e registrare le risposte che ne derivano con l'elettroencefalogramma (EEG) al fine di valutare se le risposte sono integrate e differenziate. Per far sì che un sistema sia cosciente, dobbiamo aspettarci che, perturbandolo con la TMS, la risposta registrata dall'EEG debba essere integrata e differenziata. Per "risposta integrata" si intende che per valutare se un gruppo di neuroni A è connesso a un gruppo di neuroni B, basta perturbare A per registrare un'attività anche in B. Per differenziata, invece, si intende che la risposta non deve essere omogenea, bensì complessa, cioè differenziata in relazione alle specifiche funzioni cerebrali. *"Per valutare la capacità del cervello di integrare informazione è necessario perturbare direttamente un sottoinsieme di neuroni corticali per registrare*

l'estensione (integrazione) e la complessità (l'informazione) della risposta prodotta sulla scala temporale dei millisecondi". (Tononi, 2013)

Perturbando con la TMS e registrando con l'EEG il cervello di un soggetto sveglio, troveremo che la risposta si espanderà nella maggiorparte del suo cervello (integrazione) in circa 300 millisecondi e che la risposta registrata sarà differenziata. *"Il risultato è un complicatissimo schema di attivazione spaziotemporale, dove aree diverse si accendono e si spengono con tempi e modi differenti"* (Tononi, 2013).

Perturbando il cervello durante il sonno profondo (sonno senza sogni corrispondente alla fase "non-REM") la risposta del cervello è immediata e molto forte, tuttavia è confinata all'area stimolata e la differenziazione è completamente persa.

Perturbando un paziente durante la fase REM del sonno (nella quale è più probabile che si sogni), si può ricevere una risposta molto simile allo stato di veglia (integrata e differenziata). In effetti, svegliando il soggetto durante questa fase, esso ci racconterà di aver visto volti, luoghi e paesaggi creati dalla sua coscienza. In altre parole, nel sogno la coscienza c'è e la risposta che ne deriva è molto simile allo stato di veglia.

Applicando questo approccio a pazienti in stati di coscienza alterata è possibile, in molti casi, comprendere se i pazienti sono coscienti o meno. Nel caso dei locked-in, ad esempio, la risposta sarà molto simile a quella dei soggetti sani. Nello stato vegetativo, invece, la risposta sarà più affine agli stati di sonno profondo, mentre negli stati di minima coscienza, la risposta sarà, in alcuni giorni, più complessa e in altri meno. Infine, è possibile, in alcuni casi, prevedere se un paziente in stato vegetativo è sulla strada della ripresa monitorando costantemente le sue risposte cerebrali.

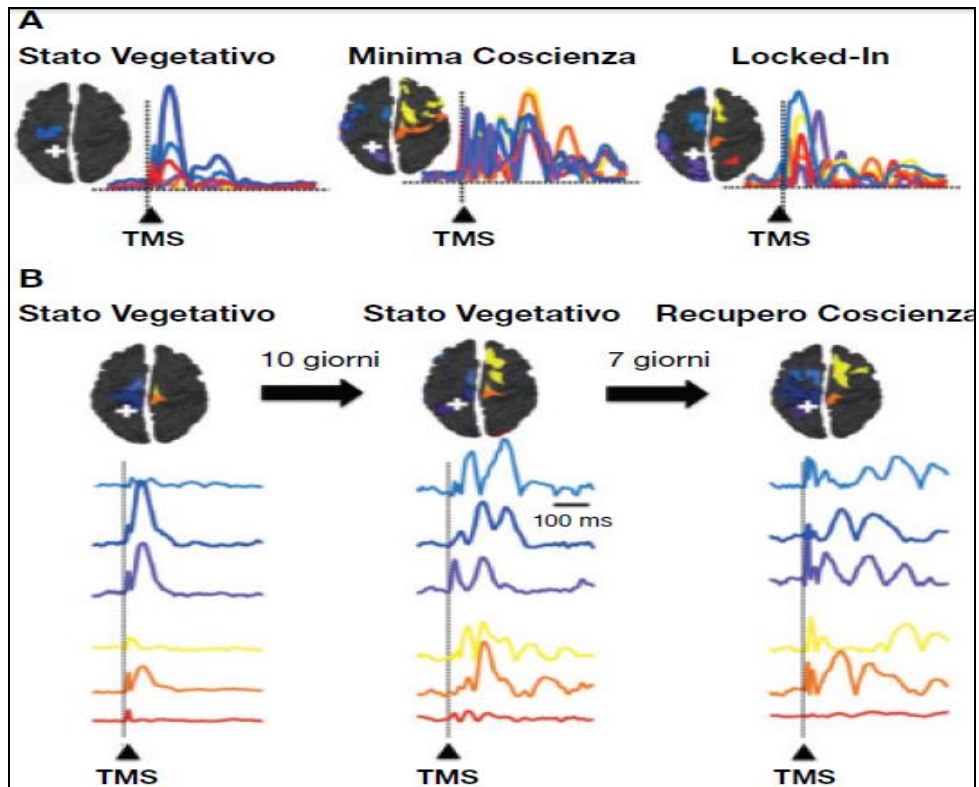


Figura 2. Stati di coscienza e recupero

L'ambito clinico sta ampliando le sue conoscenze grazie all'ausilio di nuove tecnologie che aumentano la comprensione degli stati di coscienza. Ciò consente di restituire una "voce" a quelle coscienze dimenticate e segregate all'interno del cranio che, altrimenti, rimarrebbero silenti.

2. LA TEORIA DELL'INFORMAZIONE INTEGRATA E I SUOI POSTULATI

Tra tutte le teorie sulla coscienza sembra che la Teoria dell'Informazione Integrata sia la più promettente. Essa è, infatti, supportata da diverse prove empiriche, specie in ambito clinico.

Il suo approccio si discosta da quello usualmente utilizzato nell'ambito delle neuroscienze, che tende a partire da una base neurologica per comprendere quali meccanismi dell'esperienza cosciente siano correlati al suo funzionamento. Tale scelta deriva da un problema di natura metodologica. E', infatti, possibile correlare funzioni del cervello, localizzate in determinate aree della corteccia, a specifiche attività, tuttavia la localizzazione non fornisce informazioni sulla natura fenomenologica dell'esperienza cosciente. E' necessario partire da una base teorica per dare un senso più ampio al fenomeno della coscienza, che vada oltre la mera localizzazione cerebrale delle sue attività.

I biologi utilizzarono questo stesso approccio quando, pur avendo categorizzato una miriade di specie di animali, non disponevano, ancora, di una teoria che spiegasse la loro provenienza. Ciò portò alla formulazione della teoria evuzionista, che diede un senso più ampio all'esistenza delle varie specie. Allo stesso modo, oggi conosciamo il funzionamento delle diverse aree del cervello, ma abbiamo bisogno di una teoria che ne chiarisca la provenienza.

La IIT parte da *assiomi* teorici derivanti dalla fenomenologia, per poi risalire a *postulati* che, per mezzo di relazioni matematiche, trovano un corrispettivo nel funzionamento del *substrato fisico della coscienza* (PSC). Un approccio sostanzialmente opposto a quello utilizzato finora dalle neuroscienze.

Gli assiomi della IIT derivanti dalla fenomenologia sono cinque e saranno esplicitati nei seguenti paragrafi.

2.1 Esistenza

Il primo assioma è l'*esistenza*, secondo cui la coscienza esiste dalla sua prospettiva intrinseca. Ciò significa che dobbiamo aspettarci che il *substrato fisico della coscienza* (PSC) abbia una struttura che consente al sistema di percepire se stesso. All'interno di una struttura organizzata di neuroni, ogni neurone ha due stati possibili: spento o acceso (numericamente traducibile in 0 o 1). Il funzionamento di ogni neurone può essere influenzato da *cause* (input da altri neuroni) e può comportare effetti (output verso altri neuroni). Tale postulato si traduce in uno schema in cui i neuroni sono rappresentati da *cancelli logici*, ossia dei circuiti in grado di simulare operazioni logiche tra due o più variabili binarie (il cui valore è 0 o 1). (Masafumi Oizumi, 2014)

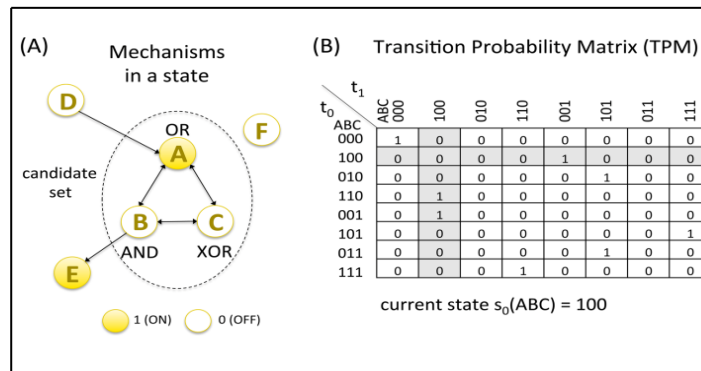


Figura 3: 1° POSTULATO DELL'IIT. ESISTENZA (Masafumi Oizumi, 2014)

Ogni lettera della figura 3 rappresenta un cancello logico. Il colore giallo ne identifica lo stato attivo (ON=1) mentre il colore bianco equivale allo stato inattivo (OFF=0). Il cerchio tratteggiato contraddistingue il "set candidato" (ABC) ossia quell'insieme di elementi che secondo l'IIT rappresenta il substrato fisico della coscienza. Gli elementi non compresi all'interno del set candidato non contribuiscono all'esperienza cosciente, pur entrando in relazione con i meccanismi che la generano. Questi sono, infatti, considerati come una "condizione di sfondo" che vincola dall'esterno lo stato del set candidato.

Nella tabella raffigurata sulla destra, troviamo, invece, la “matrice di transizione di probabilità” che racchiude tutti i possibili stati futuri (t_1), del set candidato ABC, in relazione ai possibili stati di ABC presenti (t_0).

Nel caso riportato, lo stato attuale di ABC è 100 (poiché A è acceso mentre B e C sono spenti). Tale stato è evidenziato nella seconda riga della “matrice di transizione di probabilità”. Lo stato futuro (t_1) del set candidato ABC è vincolato dal suo stato attuale (t_0).

Nella tabella è evidente come ABC attuale (100) vincola il passato di ABC futuro a 001. E' inoltre possibile risalire allo stato passato del sistema (t_{-1}), partendo dal suo stato attuale.

Per comprendere come questo sia possibile, bisogna capire il funzionamento dei cancelli logici e delle loro funzioni (AND, OR e XOR). Le funzioni di ogni cancello logico, infatti, rappresentano una particolare modalità di funzionamento di quel cancello, in base alla quale, possiamo prevedere se un “neurone” sarà acceso o spento in relazione a determinati cause (input). Nella *figura 4* sono schematizzate le tre funzioni.

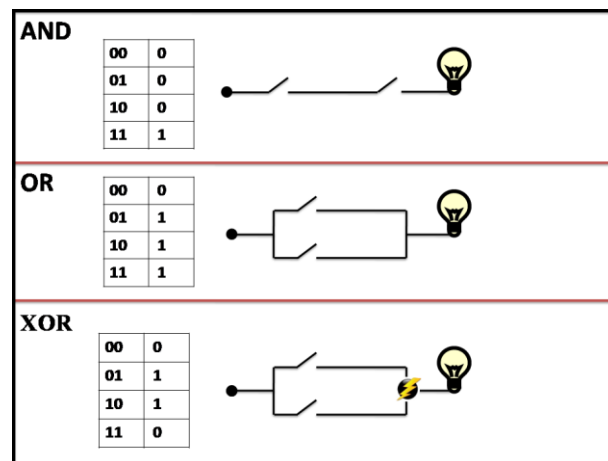


Figura 4: FUNZIONI AND, OR e XOR

La figura 4 illustra il funzionamento delle funzioni AND, OR e XOR in maniera diretta. In questo caso gli interruttori rappresentano lo stato di attivazione/disattivazione

dei cancelli logici che inviano input a un altro cancello logico (neurone). Ad esempio, nel caso della funzione AND la lampadina si accenderà solo se entrambi gli interruttori sono attivi (11). Nel caso della funzione OR, invece, la lampadina rimarrà spenta, solo se nessuno dei due interruttori è acceso (00). Infine, nella funzione XOR la lampadina si accenderà solo se un interruttore resta acceso mentre l'altro è spento (01-10). Il simbolo con il fulmine, infatti, rappresenta che la corrente può passare solo se proviene da un solo conduttore.

Nella figura 3, è possibile ragionare con le funzioni. Ad esempio, se consideriamo il cancello logico C, sappiamo che la sua funzione è XOR. Il che significa che può essere acceso, solo se uno dei due input provenienti da A e B, è attivo (1) mentre l'altro è disattivo (0). Siccome, allo stato attuale (t_0), C è spento, significa che in passato A e B, rispetto a C, o erano entrambi accesi (11) o erano entrambi spenti (00). Allo stesso modo, possiamo prevedere che lo stato futuro di C sarà acceso (1), poiché, attualmente, A è acceso e B è spento. Ciò è evidenziato anche nella “matrice di transizione di probabilità”, dove alla seconda riga (quinta colonna) si prevede che lo stato futuro (t_1) del sistema sarà 001, cioè A e B spenti e C acceso.

Sulla base di ciò, possiamo affermare che nello schema che rappresenta il postulato, derivante dal primo assioma dell'*esistenza*, è evidente che ogni cancello logico (rappresentante un neurone) ha un valore di causa-effetto intrinsecamente percepito dal sistema. Lo stato passato del sistema, infatti, vincola i valori attuali e futuri dello stesso. In altre parole, il sistema, attraverso le reciproche interazioni delle parti che lo compongono, può fare la differenza per se stesso. (Giulio Tononi, 2016)

2.2 Composizione

Il secondo assioma dell'IIT è la *composizione* secondo cui l'esperienza cosciente è strutturata, cioè composta da parti elementari, la cui combinazione forma un'esperienza unificata. Ciò significa che a livello del substrato fisico della coscienza, ossia a livello neurale, dobbiamo aspettarci che i meccanismi elementari siano combinati in strutture che formano un ordine di natura superiore, rispetto alla somma delle singole parti che

formano un sistema. In altre parole, *“Ordini superiori di meccanismi possono essere composti combinando meccanismi elementari”*. (Masafumi Oizumi, 2014)

La conformazione di connettività dei neuroni, per rispettare tale principio, deve, dunque, far in modo che, partendo da strutture semplici, si possa giungere a conformazioni complesse sulla base degli stessi meccanismi elementari. Ciò rimanda a un parallelismo con la “geometria frattale”, in cui forme basilari si ripetono su diverse scale, formando ordini di meccanismi più elevati. Tale geometria è riscontrabile in molti elementi della natura. Ad esempio, in alcuni alberi come l’abete, i rami tendono a ripetere la forma dell’albero stesso, e, allo stesso modo, i rametti tendono a ripetere la forma dei rami di provenienza. La geometria del tronco, sembra, dunque, ripetersi sulla base della medesima struttura elementare, fino a formare la totalità dell’albero.

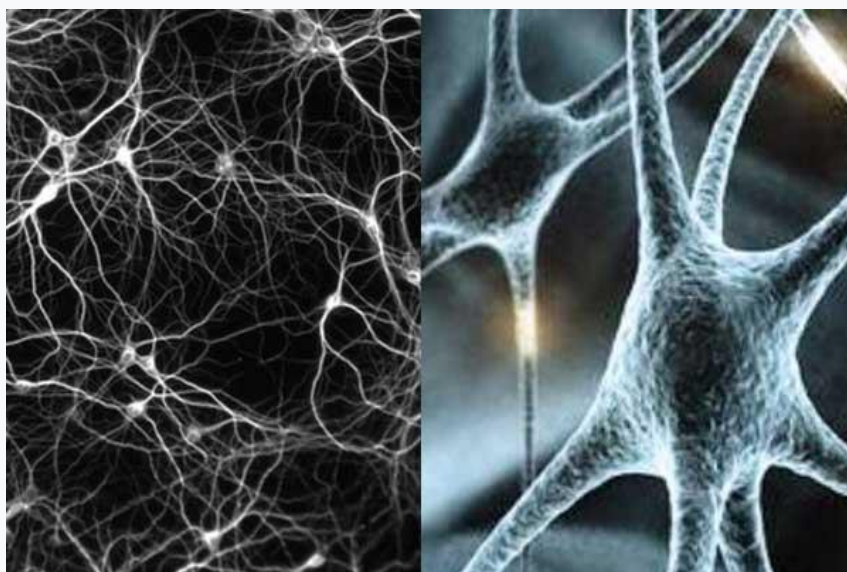


Figura 5. Struttura frattale dei neuroni.

Il matematico polacco Benoît Mandelbrot, studioso della geometria frattale, riteneva che *“in qualche modo, i frattali abbiano delle corrispondenze con la struttura della mente umana: è per questo che la gente li trova così familiari. Questa familiarità è ancora un mistero, e più si approfondisce l’argomento, più il mistero aumenta”*.

Probabilmente, se Mandelbrot fosse ancora vivo, e se avesse conosciuto il secondo principio della composizione della IIT, forse, avrebbe potuto comprendere che anche la coscienza parte da una geometria di base, la quale, ripetendosi continuamente, forma la totalità della coscienza. Il mistero rimane, ma, in conformità a tale principio, è più semplice comprendere come vi sia una sovrapposizione tra la geometria frattale appartenente al mondo esterno, e la geometria che pone in relazione le strutture cerebrali dedite alla formazioni della coscienza.

Essendo la coscienza un'esperienza unificata, composta da varie parti elementari, la cui somma genera una totalità superiore a quella derivante delle singole parti da cui è composta, ci aspettiamo di poter quantificare in che modo i neuroni (rappresentati da cancelli logici) possano relazionarsi al fine di formare un sistema, il cui funzionamento produce una quantità d'informazione superiore a quella che si otterrebbe sommando l'informazione prodotta da ogni singolo neurone preso singolarmente.

Per avere un riscontro tangibile con tali affermazioni ripartiamo dalla relazione tra vari cancelli logici rappresentanti i neuroni.

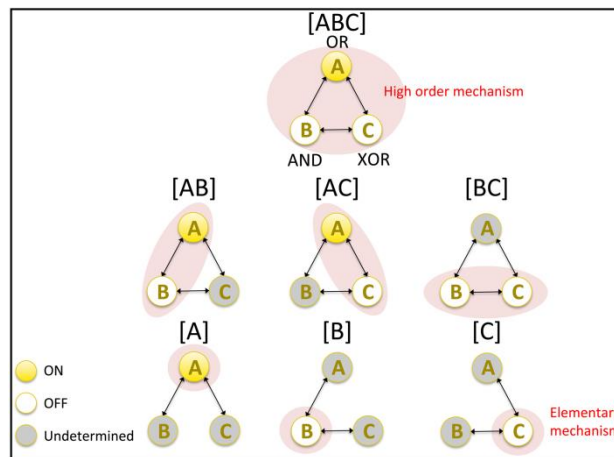


Figura 6: 2° POSTULATO IIT. COMPOSIZIONE

Nella figura 6 è inserito il secondo postulato derivante dall'assioma della *composizione*. A, B e C sono i meccanismi elementari cosiddetti “*di primo ordine*” (nella parte bassa della figura). Combinandoli, è possibile costruire meccanismi di ordine superiore.

Coppie di elementi formano meccanismi del “*secondo ordine*” (AB, AC, BC) e tutti gli elementi insieme formano il meccanismo del “*terzo ordine*” (ABC). Gli elementi all'interno dell'insieme candidato, ma al di fuori del meccanismo preso in considerazione, sono considerati fonti di disturbo indipendenti e non determinabili. (Masafumi Oizumi, 2014)

Dobbiamo aspettarci che la quantità superiore d'informazioni sarà data dal “*terzo ordine*”, cioè dalla situazione in cui i cancelli logici sono considerati all'interno di uno stesso “set candidato”, dove gli stati possibili dei cancelli logici sono determinabili. E' quindi possibile affermare che i meccanismi di ordine superiore possono essere composti combinando meccanismi elementari.

2.3 Informazione

Il terzo assioma della IIT è l'*informazione*, secondo cui l'informazione contenuta all'interno della coscienza è specifica. (Giulio Tononi, 2016) Ciò significa che il contenuto dell'esperienza cosciente esclude tutti gli altri contenuti possibili. Se, ad esempio, il campo visivo di un individuo è focalizzato su un paesaggio montano, l'esperienza cosciente di questo sarebbe il paesaggio montano, e non il mare, un vaso o un volto. L'esperienza del paesaggio esclude, dunque, le altre esperienze coscienti.

Maggiore è la quantità delle esperienze escludibili da un sistema, maggiore è l'informazione. Ad esempio, un fotodiodo è un sensore ottico che rileva la luce ed è in grado di reagire a essa con uno stimolo elettrico. Gli stati possibili del fotodiodo sono solo due: “spento” (0) o acceso (1). Se si posiziona un fotodiodo in una stanza buia, esso segnerà 0, ma se si accende la luce, esso si attiverà (1). Anche una persona lasciata in una stanza buia sarebbe in grado di eseguire una discriminazione simile, ma non possiamo pensare che utilizzi gli stessi meccanismi di un fotodiodo.

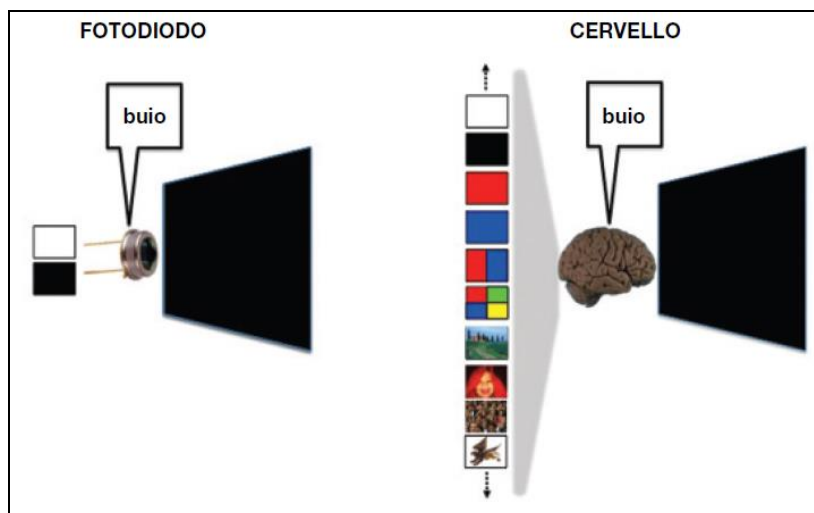


Figura 7. Un fotodiode e un cervello che riconoscono il buio

La differenza fondamentale risiede proprio nella quantità di esperienze escludibili da una persona rispetto al fotodiode. Quando c'è luce, il fotodiode esclude solo lo stato del buio, mentre un individuo ha una quantità enorme di stati escludibili. Basta pensare che se cambiassimo il colore della luce, il fotodiode non noterebbe alcuna differenza e continuerebbe a segnalare i suoi due stati (0-1), mentre, invece, una persona noterebbe subito la differenza, poiché il suo repertorio di esperienze è molto più ampio di quello del fotodiode. (G.Tononi, 2013) Perfino la percezione del buio, che è quanto di più semplice possa essere percepito dal sistema visivo, cambia radicalmente tra una persona e un fotodiode: *“Ma per il fotodiode, buio doveva aver significato molto di meno. Con il suo meccanismo semplice, esso non aveva modo di sapere che il buio non era un colore, che non era un volto e nemmeno un luogo, che non era un suono o un odore o un sapore, e nemmeno una sensazione o un pensiero. Per il fotodiode buio non era “buio”, ma semplicemente uno tra due. Il suo intero universo si riduceva a “questo sì”, “questo no”.* (Tononi, 2014)

Siccome l'informazione è specifica e la sua quantità cresce all'aumentare degli stati escludibili rispetto a quello che si sta esperendo, dobbiamo aspettarci che, a livello neurale, ci siano degli stati che ne escludano altri. Il punto è comprendere quali meccanismi cambino la conformazione e il funzionamento del sistema, vincolando gli stati passati e futuri del sistema stesso. Ciò che costituisce l'informazione è la

possibilità di uno specifico stato passato del sistema di vincolare lo stato futuro dello stesso; quanti più stati possibili saranno esclusi, tanto più elevata sarà l'informazione. "Le informazioni come "differenze che fanno la differenza" per un sistema dalla sua prospettiva intrinseca, possono essere quantificate considerando come un meccanismo, nel suo stato attuale, limiti i potenziali stati passati e futuri del sistema." (Masafumi Oizumi, 2014)

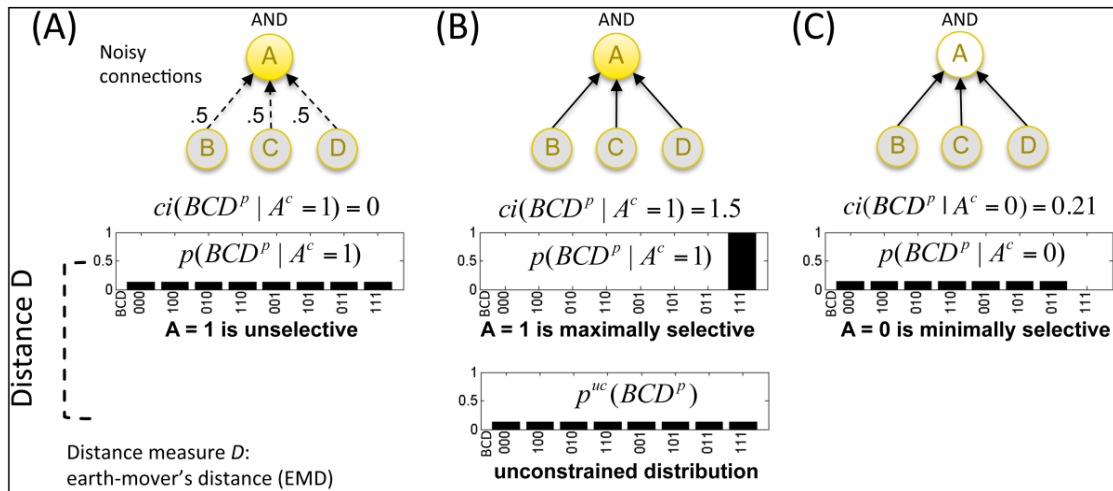


Figura 8. 3° POSTULATO IIT: INFORMAZIONE

La figura 8 illustra come un meccanismo A vincoli gli stati passati di tre sistemi differenti. A è una porta AND cui afferiscono degli Input, considerati con cause passate che spiegano l'attuale stato di A. La distribuzione degli stati passati è chiamata "repertorio causale" di A.

Nel primo sistema, a sinistra, le connessioni tra A e BCD sono costituite da rumore, quindi, lo stato corrente di A non fornisce alcuna informazione sullo stato di BCD. Siccome non possiamo prevedere nulla rispetto a BCD, dobbiamo considerare che il "repertorio causale" di BCD può essere rappresentato da tutte le combinazioni possibili dei valori 0-1. In tutto le combinazioni sono 8 poiché gli stati di ogni cancello logico sono 2 (cioè 0 o 1) combinati in gruppi da 3 (BCD). Il calcolo è, dunque, $2^3=8$. Possiamo trovare le 8 combinazioni sotto ogni sistema. Le colonnine nere indicano quanta probabilità c'è che si verifichi una combinazione piuttosto che un'altra. Nel primo caso, dove le connessioni sono costituite da rumore, tutte le combinazioni hanno

la stessa probabilità di verificarsi. In altre parole, il repertorio causale è identico alla “*distribuzione non vincolata*” che rappresenta tutte le possibili combinazioni indipendentemente dagli stati passati. Ad esempio, in un dado la distribuzione non vincolata è rappresentata dall’attribuzione di $1/6$ delle possibilità a ognuno dei 6 numeri possibili (1,2,3,4,5,6). Possiamo affermare che, in questo primo caso, A non genera alcuna informazione. Lo stato attuale di A, infatti, non riesce a fornire nessuna informazione sullo stato passato di BCD.

Al contrario, nel secondo sistema (B), le connessioni tra A e BCD non sono “rumore”, ma sono considerate deterministiche. A è attivo ($A = 1$) e, essendo una porta AND, la sua attività è possibile solo se i cancelli logici da cui riceve Input sono tutti attivi. Lo stato passato di BCD è completamente vincolato, poiché l’unico stato compatibile con $A=1$ è $BCD = 111$. Ciò è specificato anche dalla colonnina evidenziata in nero appena sotto la figura, che segnala che l’unico stato passato possibile è 111. In questo caso, il repertorio causale è massimamente selettivo, e corrisponde al grado più elevato d’informazione.

Nel terzo sistema, a destra, A è disattivato (0). Essendo una porta AND, la sua inattivazione può dipendere da tutte le possibili combinazioni tranne che da 111 (che invece comporterebbe un’attivazione di A). Il repertorio causale è meno selettivo, perché 7 combinazioni su 8 hanno uguale probabilità di essere rappresentative del passato. Lo stato attuale di A, dunque, vincola solo parzialmente lo stato passato di BCD.

Ricapitolando, nella figura più a sinistra, il repertorio causale di A è considerato “non selettivo”, poiché potrebbe essere seguito da qualsiasi stato. Nel caso esposto al centro della figura, il repertorio causale di A è “massimamente selettivo”, perché tutti gli stati tranne 111 sono esclusi come possibili cause dell’attivazione di A. Infine, nell’ultimo caso esposto sulla destra, il repertorio causale di A è molto meno selettivo rispetto al secondo presentato, perché solo lo stato 111 è escluso come possibile causa dell’inattivazione di A. (Masafumi Oizumi, 2014)

Il principio dell’informazione ci pone inevitabilmente di fronte ad una divisione temporale. Infatti, ciò che permette alla struttura cerebrale di generare informazioni,

deriva dalla capacità degli stati passati di un sistema di vincolare i suoi stati futuri. Il fatto che la coscienza esista all'interno di uno spazio-tempo sembra, dunque, di vitale importanza. Un sistema può percepire se stesso, solo se le parti da cui è composto generano "differenze che fanno la differenza dalla prospettiva intrinseca del sistema stesso". Tuttavia ciò è possibile soltanto se si considera che il sistema non si limiti a esistere in un solo tempo, bensì lungo un continuum temporale composto da presente, passato e futuro. L'esistenza all'interno di un continuum spazio-temporale è fondamentale affinché il funzionamento delle diverse parti del sistema cerebrale trovi le sue cause nel passato e produca effetti per il futuro.

Il repertorio d'informazione causale (ic) e il repertorio d'informazione degli effetti (ei), sono ciò che lega la coscienza allo spazio-tempo, generando informazioni derivanti dalla costrizione degli stati futuri, sulla base del funzionamento di quelli passati.

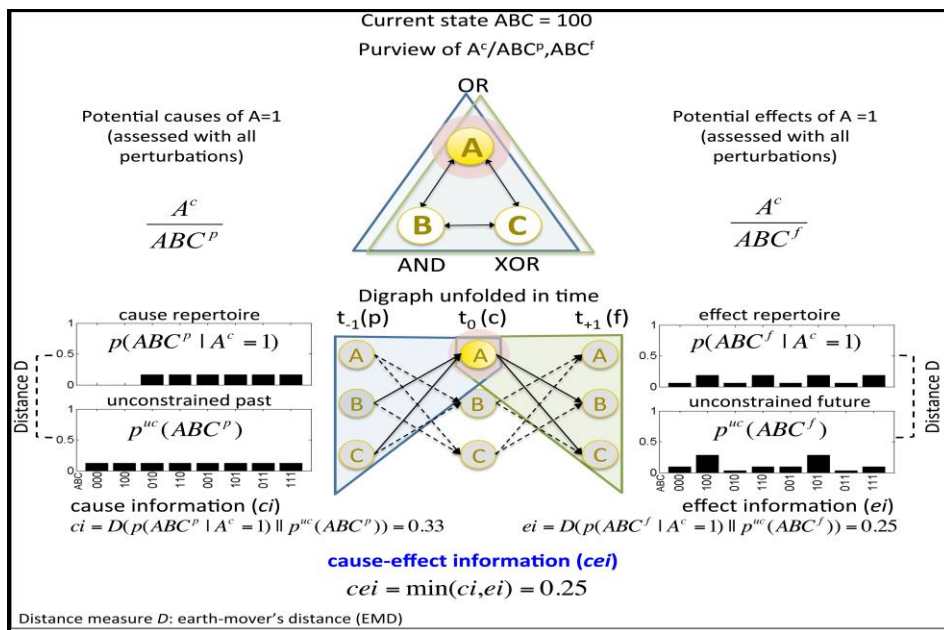


Figura 9. Informazione: "Differenze che fanno la differenza per un sistema dalla sua prospettiva intrinseca" (Masafumi Oizumi, 2014)

Un meccanismo genera informazioni vincolando gli stati passati e futuri del sistema. Nella figura 9, il triangolo in alto, mostra il set candidato composto da porte OR, AND e XOR nel suo stato attuale 100.

Consideriamo il cancello logico A (evidenziato in rosso) sia rispetto al passato (triangolo blu), che al futuro (triangolo verde) . Appena sotto i triangoli, troviamo la stessa situazione esposta su una scala temporale: a sinistra il passato, al centro il presente e a destra il futuro. Conosciamo solo lo stato attuale di A, mentre tutti gli altri cancelli logici (colorati di grigio) sono considerati “indeterminati”. Lo stato attuale del meccanismo A, vincola il passato e il futuro del sistema.

La distribuzione vincolata degli stati passati è il repertorio causale di A (a sinistra). La distribuzione vincolata degli stati futuri è il repertorio degli effetti di A (a destra).

Le informazioni causali (*ci*) sono quantificate misurando la distanza D tra il *repertorio causale* e il *repertorio del passato non vincolato*, ossia quel repertorio secondo cui tutti gli stati passati hanno uguale probabilità di esistere. In altre parole, il repertorio del passato non vincolato è un repertorio che non tiene conto del sistema causa-effetto, per cui ogni stato passato può verificarsi con uguale probabilità (come nel lancio di un dado). Le informazioni causali (*ci*) sono date proprio dalla distanza D tra il repertorio causale, che rappresenta gli stati passati del sistema in relazione al presente, e il repertorio del passato non vincolato, che rappresenta un sistema in cui tutto è possibile in ugual modo, senza considerare lo stato attuale. Semplificando si potrebbe affermare che la quantità d'informazioni causali sono derivanti dalla differenza tra ciò che avviene a causa del passato relazionato con il presente, con tutto ciò che potrebbe essere accaduto senza considerare il presente.

Allo stesso modo, l'informazione sull'effetto (*ei*) viene quantificata misurando la distanza D tra il repertorio degli effetti e il *repertorio del futuro non vincolato*. “Si noti che il repertorio futuro non vincolato non è semplicemente la distribuzione uniforme, ma corrisponde alla distribuzione dei futuri stati del sistema con input non vincolati a ciascun elemento”.

2.4 Integrazione

Il quarto assioma della IIT è l'*integrazione* secondo cui l'esperienza è unitaria e irriducibile alle singole parti che la compongono. Il contenuto della coscienza è

integrato in un'esperienza unitaria che, se venisse frammentata, perderebbe il suo valore. *“Prendi una parola di una dozzina di lettere, e lascia che ciascun uomo pensi la propria lettera. Ebbene, da nessuna parte ci sarà la coscienza della parola intera”*. (Tononi, 2014) Ma come possono elementi molteplici essere una sola cosa? Come possono, ad esempio, miliardi di fotoni di luce, essere concepiti come una sola immagine?

Per rispondere a queste domande è utile rifarsi ad un esempio introdotto da Tononi. Consideriamo una fotocamera composta da un milione di fotodiodi, ognuno dei quali risponde ad una variazione dell'intensità luminosa. Le immagini prodotte dalla fotocamera sono il risultato della risposta dei singoli fotodiodi che, affiancati l'uno accanto all'altro ci danno l'interezza dell'immagine. Tuttavia l'unità dell'immagine fornita dalla telecamera è soltanto un'illusione. Essa è solo la somma di singoli frammenti, fornita da singoli fotodiodi, perfettamente indipendenti tra loro. Qualunque cosa accade ad un fotodiodo non fa alcuna differenza per tutti gli altri. Se dividessimo in due il sistema, esso continuerebbe a funzionare nello stesso e identico modo. Ciò accade perché nella scatola della telecamera non c'è una singola unità che ha a disposizione miliardi di stati, ma semplicemente un milione di fotodiodi, ossia un milione di singole entità con due stati ciascuna. Se dividessimo in due un cervello, invece, la situazione sarebbe completamente diversa. In questo caso, infatti, si genererebbero due coscienze. Nei pazienti affetti da forme gravissime di epilessia, in passato, si arrivava a tagliare il corpo calloso per dividere i due emisferi cerebrali. In questo modo, la crisi epilettica originatasi in un emisfero, senza quell'autostrada di circa duecento milioni di fibre, (rappresentata dal corpo calloso) non riusciva a propagarsi all'altro emisfero. Il risultato era il cosiddetto *“split-brain”* (cervello diviso). I soggetti presentavano due esperienze coscienti separate all'interno dello stesso corpo. L'emisfero di sinistra parlava, quello di destra era più bravo a disegnare o a riconoscere l'espressione dei volti. Ciascun emisfero aveva le proprie esperienze private ma l'esperienza unitaria era irrimediabilmente persa. (Tononi, 2013)

Se si dividesse la fotocamera in 10 parti o in un milione di parti il suo funzionamento continuerebbe ad essere lo stesso, ma se si facesse una cosa simile con il cervello la

coscienza perderebbe la sua integrazione poiché il suo funzionamento è irriducibile all'azione delle singole parti che lo compongono.

L'integrazione delle informazioni, secondo la IIT può essere quantificata matematicamente. Il simbolo dell'informazione integrata è Φ (phi) considerato da sempre come il numero del rapporto aureo, dove la I sta per *Informazione* e il cerchio per *integrazione*.

Una volta compreso che la coscienza è un'esperienza unitaria e irriducibile, dobbiamo aspettarci che anche all'interno del sistema cerebrale, le strutture che generano la coscienza formino dei sistemi unitari e non riducibili alle singole parti che li compongono. *“L'esperienza cosciente è integrata – ossia, ogni stato di coscienza dev'essere esperito come una singola entità. Ciò significa che il substrato della coscienza, deve anch'esso costituire una singola entità integrata”*. (Tononi, 2013)

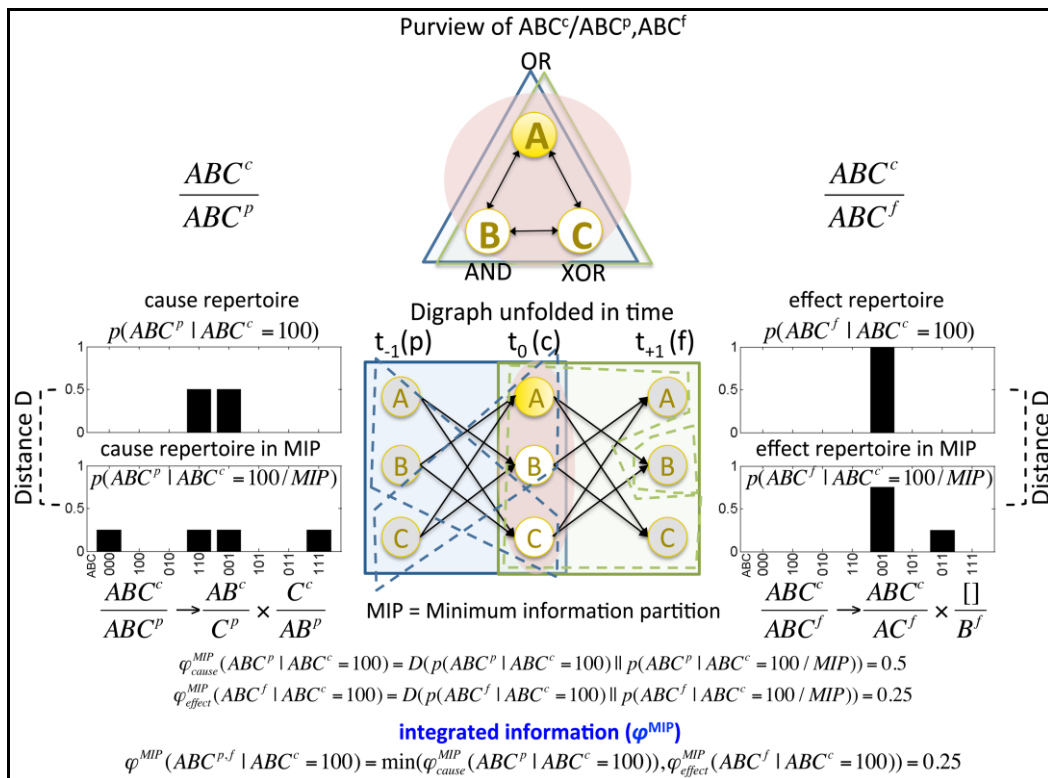


Figura 10. 4° POSTULATO: INTEGRAZIONE

La figura 10 rappresenta un complesso ABC nel suo stato passato, presente e futuro. Ogni cancello logico passato è collegato agli altri due cancelli logici nel presente; ogni cancello logico nel presente è collegato agli altri due nel futuro. Ciò genera un sistema complesso e integrato nel tempo che (come visto nel postulato dell'*informazione*) produce una quantità d'informazione proporzionale alla quantità di vincoli causali imposti dal passato e dal futuro del complesso ABC. Questa fitta rete di connessioni, che prende in considerazione anche lo stato passato e futuro del sistema, genera un complesso unitario e integrato che può produrre un'esperienza cosciente altrettanto unitaria e integrata. Il funzionamento integrato di questo sistema è correlato con un'esperienza cosciente unitaria e continua nel tempo. Ciò che proviamo nel momento presente non è, infatti, completamente svincolato dal passato e dal futuro, poiché l'esperienza cosciente segue una certa direzione temporale, riscontrabile anche a livello del funzionamento neuronale.

Tagliare una sola delle connessioni all'interno del sistema riportato in figura, danneggerebbe la quantità d'informazione integrata ϕ . Anche tagliando il meccanismo che fa la minima differenza all'interno del complesso, il livello di ϕ decrescerebbe.

La partizione minima informativa (MIP) è la partizione che causa la diminuzione più contenuta di ϕ rispetto a qualsiasi altra partizione. Ciò significa che “è la partizione che fa la minima differenza per i repertori di causa ed effetto che sono indicati da linee tratteggiate nel sistema spiegato in figura (10)”.(Masafumi Oizumi, 2014)

L'informazione integrata ϕ è quantificata misurando la distanza tra il repertorio della causa specificato dall'intero meccanismo e il meccanismo partizionato. In altre parole, ϕ è dato dalla distanza “D” tra il meccanismo preso interamente e il meccanismo preso in maniera partizionata.

Per comprendere meglio la situazione entriamo all'interno della figura 10 e prendiamo in considerazione ABC^c (attuale) e ABC^f (futuro). Nel repertorio degli effetti (*effect repertoire*) è riportata una sola colonna nera, la quale specifica che al tempo futuro (t_{+1}) lo stato di ABC sarà sicuramente 001. Lo stato attuale di ABC, dunque, fornisce abbastanza informazioni da poter prevedere il suo stato futuro. L'esclusione di tutti gli altri possibili stati futuri (eccetto 001) fornisce un livello elevato d'informazione. Il

cancello logico C^f (futuro) è uno XOR e riceve input da A^c e da B^c (attuali); essendo A acceso e B spento, è inevitabile che C^f si accenda.

La situazione cambia quando, invece, eseguiamo il partizionamento minimo MIP escludendo le connessioni verso il cancello logico B^f (come contraddistingue la linea tratteggiata in verde). In questo caso, infatti, B^f (futuro) è svincolato dagli input di A^c e C^c , dunque, non possiamo affermare (come nel repertorio degli effetti) che il valore di ABC^f sarà sicuramente 001, poiché B^f potrebbe essere sia acceso, sia spento. Ciò significa che, anche se è più probabile che si verifichi la condizione futura in cui gli stati di ABC^f sono pari a 001, potrebbe verificarsi anche la condizione in cui ABC^f è 011 (come riportato dalla seconda colonna nera nel repertorio degli effetti in MIP). L'informazione, in questo secondo caso, è minore, poiché maggiori sono gli stati possibili del sistema.

L'identità fondamentale della IIT è collegata molto al concetto dell'Informazione Integrata. Secondo la IIT, infatti, la qualità o il contenuto della coscienza è specificato dalla struttura del *substrato fisico della coscienza* e la quantità di coscienza corrisponde alla sua irriducibilità (informazione integrata ϕ). (Tononi, 2016)

2.5 Esclusione

Secondo l'assioma dell'*esclusione*, l'esperienza cosciente ha dei confini sia dal punto di vista dei contenuti, che dal punto di vista spazio-temporale. Essa, infatti, ha un contenuto definito ed avviene in un preciso lasso temporale. In altre parole, la coscienza esclude tutto ciò che non fa parte di essa; ciò le conferisce una forma definita nei contenuti e nel tempo.

Se la coscienza esclude ciò che non è contenuta in essa in un particolare lasso di tempo, dobbiamo aspettarci che, anche a livello neurale la coscienza dipenda da una specifica conformazione funzionale che ne esclude altre all'interno di un determinato lasso di tempo. Dalla prospettiva intrinseca del sistema, ciò è traducibile rifacendosi ai repertori delle cause e degli effetti. Secondo la IIT, infatti “*Un meccanismo può avere solo una*

causa e un effetto, quelli che sono massimamente irriducibili; altre cause ed effetti sono esclusi” (Giulio Tononi, 2016).

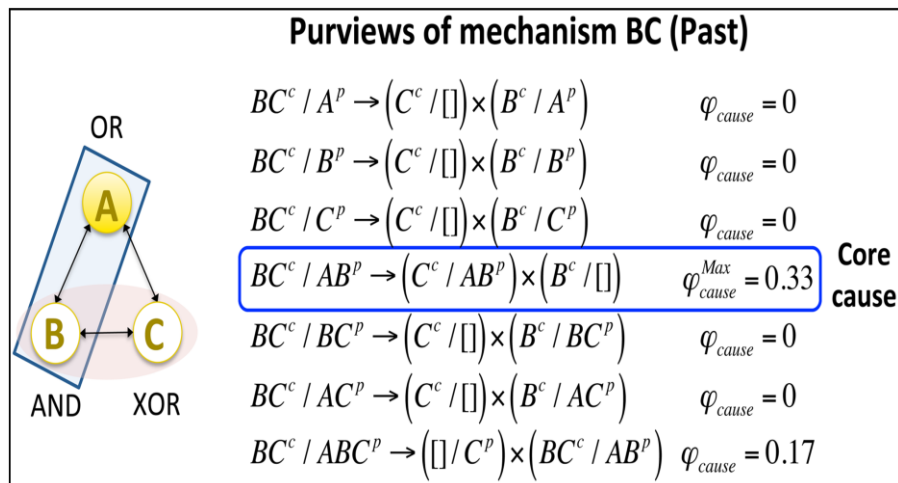


Figura 11. Scelta della causa di un meccanismo

La causa principale di un meccanismo dalla sua prospettiva intrinseca è il suo repertorio di cause massimamente irriducibile (MIC). Il concetto di causa è inteso come una distribuzione di probabilità degli stati passati di un sistema. Si consideri ad esempio il meccanismo BC=00 nella figura 11. Per trovare la causa principale di BC, è necessario valutare il repertorio causale (ϕ causale) di tutte le versioni precedenti del set da cui potrebbe essere stato alimentato $P = \{A^p, B^p, C^p, AB^p, AC^p, BC^p, ABC^p\}$. In questo caso BC^c/AB^p ha il valore più alto di $\phi_{causale}(P|BC^c=00)=0,33$ dove la P rappresenta i potenziali passati. Il corrispondente repertorio causale irriducibile è quindi la causa principale di BC=00. L'effetto di base è valutato allo stesso modo: è il repertorio dell'effetto massimamente irriducibile di un meccanismo con ϕ degli effetti ($F|BC^c=00$), dove F indica l'insieme dei potenziali stati futuri. Un meccanismo che specifica una causa ed un effetto massimamente irriducibili (MICE) costituisce un *concetto*. (Masafumi Oizumi, 2014).

Per comprendere la motivazione dietro al postulato dell'esclusione, possiamo applicarlo a un singolo meccanismo, considerando un neurone con diverse sinapsi, di cui alcune forti e altre deboli.

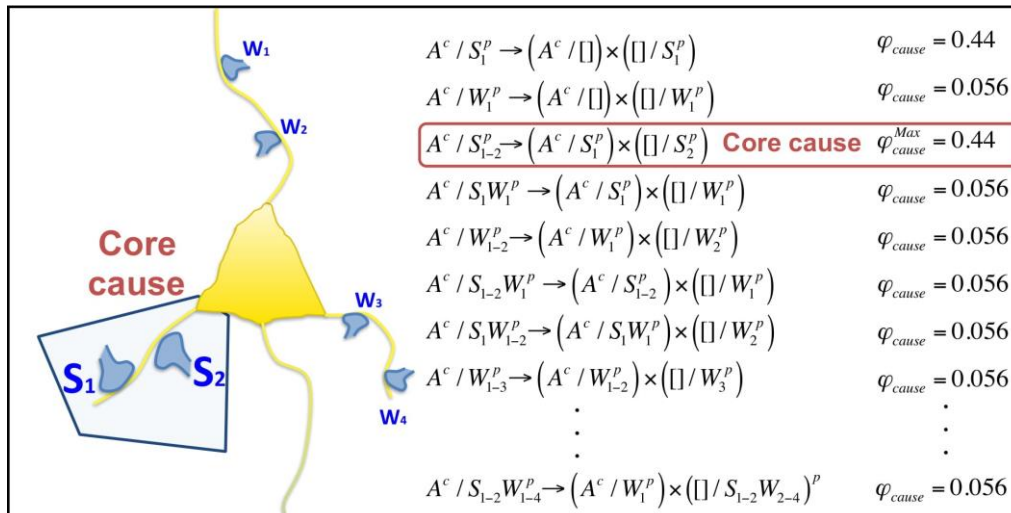


Figura 12. 5° postulato: esclusione

Il postulato di esclusione richiede, innanzitutto, che esista un'unica causa che possa spiegare lo stato attuale di un meccanismo. Il singolo neurone, dalla sua prospettiva intrinseca potrebbe attivarsi sia a causa di sinapsi forti, che di deboli, oppure potrebbe attivarsi a causa di sinapsi sia deboli che forti, oppure a causa delle sinapsi più i recettori del glutammato o ancora per mezzo dell'azione dei raggi cosmici. Non possiamo tuttavia attribuire tutte queste cause, altrimenti il repertorio causale tenderebbe all'infinito. Il principio dell'esclusione riconduce alla visione del Rasoio di Occam, secondo cui non occorre trovare più cause di quelle che riescono già a spiegare un dato fenomeno. Applicando tale principio a questa situazione, non possiamo attribuire l'attivazione del neurone sia all'afferenza di sinapsi deboli, sia a quella di sinapsi forti, sia all'azione dei recettori del glutammato. (Oizumi, 2014) Infatti, anche se tutte questi fattori potrebbero, effettivamente, attivare il neurone, in realtà la sua attivazione è collegata a un'unica causa e non a tutte le possibili cause che potrebbero giustificare tale situazione. Inoltre, sappiamo che, nel caso della coscienza, la causa è quella massimamente irriducibile, ossia quella che forma un sistema collegato all'intero meccanismo, la cui somma è superiore alle singole parti che formano il sistema. Tutto ciò, tradotto a livello neurale, significa che possiamo attribuire la causa dell'attivazione di un meccanismo, a quegli output del neurone che, se eliminati con un

partizionamento, farebbero la differenza maggiore per il sistema. Nella figura riportata le cause sembrano essere S_1 e S_2 che hanno il valore maggiore di ϕ causale (0,44).

Le cause e gli effetti prese in considerazione, sono quelle che generano la quantità massima d'informazione integrata, all'interno dello stesso insieme che include passato (P) e futuro (F). La quantità d'informazioni integrate generate dal sistema è il valore minimo tra le cause e gli effetti espressi nel loro massimo valore.

Ricapitolando, secondo il principio di esclusione, un'esperienza è definita nel suo contenuto e nel suo spazio-tempo. La durata dell'istante di coscienza è definita e va da poche decine di millisecondi a qualche centinaio di millisecondi. Inoltre, anche la struttura causa-effetto deve essere definita. Quest'ultima deve, infatti, specificare un repertorio finito di repertori causa-effetto su un determinato insieme di elementi, in un preciso lasso temporale. (Tononi, 2016)

3. LO SPAZIO-TEMPO

3.1 Tempo assoluto e tempo relativo

Per comprendere i problemi dello studio sulla coscienza e per poterne trovare una soluzione, potrebbe essere utile partire da quegli stessi problemi che la fisica moderna ha incontrato nello studio dei fenomeni naturali. Nel corso dell'ultimo secolo, infatti, la fisica si è ritrovata a dover mettere in discussione il suo approccio e le sue teorie, fin dalle basi più profonde di spazio e di tempo.

“La fisica moderna ha confermato nel modo più drammatico (...) che tutti i concetti che utilizziamo per descrivere la natura sono limitati; non sono aspetti della realtà come tendiamo a credere, ma creazioni della mente”. (Capra, 1982) Ciò che raggiungiamo con la logica si modifica con l'espandersi dell'esperienza. La conoscenza del mondo è possibile in relazione a schemi interni che seguono una logica interna. La coscienza non esperisce il mondo nella sua interezza, ma in relazione alla propria struttura intrinseca. Le reti neurali creano delle conformazioni fisiche, le quali riescono a percepire il mondo internamente. Secondo Damasio, la capacità del nostro corpo di trasformare l'ambiente esterno in *mappe neurali*, è essenziale per lo sviluppo della coscienza. Inoltre, oltre a mappare gli stati corporei, il cervello può anche trasformarli, al fine di simulare quelli che non si sono ancora verificati. *“Attualmente nella fisica moderna i fisici sono arrivati a comprendere che tutte le loro teorie dei fenomeni naturali sono creazioni della mente dell'uomo; proprietà della nostra mappa concettuale della realtà”* (Capra, 1982).

C'è una differenza innegabile tra la realtà oggettiva e la realtà soggettiva. Per comprendere meglio tale affermazione può essere utile fare un esempio partendo dal modo in cui la coscienza di un individuo percepisce la luce.

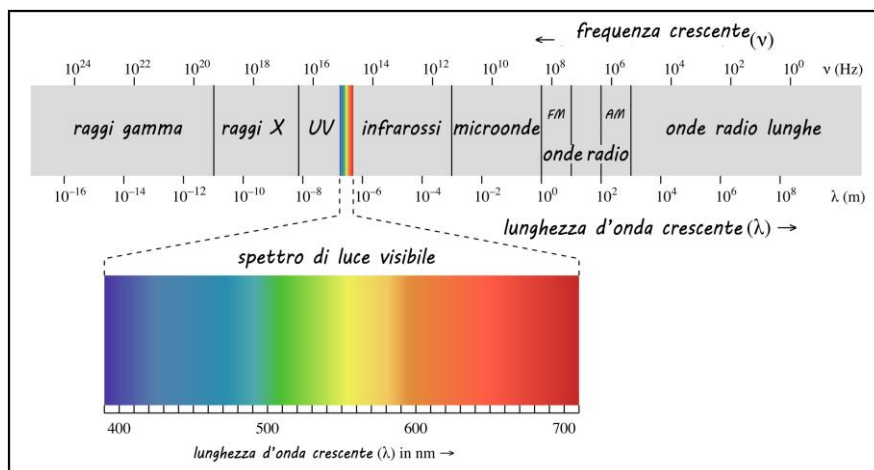


Figura 13. Spettro visibile e spettro invisibile

Nella figura 13 è riportato l'intero spettro di luce. Tra i raggi infrarossi e quelli UV troviamo una piccola zona colorata che rappresenta lo spettro di luce visibile all'essere umano. Anche se nella realtà esistono diverse frequenze di luce, la coscienza di un essere umano può percepirne solo una frazione. Ciò comporta una differenza sostanziale tra la realtà di luce esterna e la consapevolezza che la mente ne ha. La struttura della mente costruisce in modo attivo la realtà e non ne ha una visione oggettiva e totale. Solo determinate frequenze e determinate lunghezze d'onda possono essere captate dall'occhio affinché si generi un'esperienza cosciente di esse. La stessa cosa vale per le frequenze sonore, le quali non possono essere percepite se non in maniera parziale. In altre parole, la mente ha dei limiti di percezione sulla realtà (derivanti anche dalla conformazione fisica degli organi di percezione).

Questi sono solo alcuni degli esempi che portarono i fisici a comprendere che la visione cosciente del mondo è parziale, e che ogni approccio verso la sua conoscenza è influenzato dalla struttura della coscienza stessa. Ciò vale per la luce, ma anche per il suono, per il gusto, per il tatto e perfino per la struttura stessa dello spazio-tempo.

La fisica classica era fondata sull'idea di uno spazio assoluto, tridimensionale, indipendente dagli oggetti materiali in esso contenuti e regolato dalle leggi della geometria euclidea. Anche il tempo era inteso come assoluto, cioè come un flusso che scorreva in maniera omogenea, uniforme e indipendente dal mondo materiale. “Fu

necessaria l'opera di Einstein affinché scienziati e filosofi si rendessero conto che la geometria non è inerente alla natura, ma è imposta a essa dalla nostra mente". (Capra, 1982)

La nuova concezione di spazio e di tempo si basa sulla scoperta che tutte le misure di spazio e di tempo sono relative. Per quanto riguarda la relatività dello spazio, tale concezione non costituiva nulla di nuovo, poiché, anche prima di Einstein, era noto che per identificare la posizione di un oggetto nello spazio, era necessario prendere come riferimento un altro oggetto. In altre parole, non si può individuare la posizione di un oggetto in relazione a se stesso, ma bisogna farlo sempre in relazione ad un altro punto di riferimento nello spazio.

Einstein affermò che anche il tempo dipende dall'osservatore ed è, dunque, relativo. Secondo il fisico americano Fritjof Capra, nella vita quotidiana, l'impressione di poter ordinare gli eventi in un'unica sequenza temporale, è creata dal fatto che la velocità della luce (300.000 chilometri al secondo) è tanto grande rispetto a qualsiasi altra velocità della quale possiamo avere un'esperienza diretta, da poter supporre che stiamo osservando gli eventi nell'istante stesso in cui avvengono. La luce impiega un certo tempo per andare dall'evento all'osservatore. Il lasso di tempo tra lo svolgersi di un evento e la sua osservazione è decisivo affinché la coscienza ne comprenda la sequenza temporale. Ad esempio, la luce del sole impiega, mediamente, 8,31 minuti per arrivare sulla Terra. Ciò significa che un essere cosciente che si trova sulla Terra vede il sole di 8,31 minuti prima. E' evidente che la coscienza della realtà è in ritardo rispetto alla realtà stessa, sia perché la luce, il suono e qualsiasi altro elemento percepito, impiegano un certo tempo per giungere fino al nostro corpo, sia perché il cervello ha bisogno di un certo tempo per elaborare le informazioni al fine di tramutarle in un'esperienza cosciente. Secondo la relatività *"eventi che per un osservatore possono apparire simultanei, possono avvenire in differenti sequenze temporali per un altro osservatore. A velocità ordinarie gli effetti sono talmente contenuti da non poter essere rilevati, ma quando ci si avvicina a velocità simili a quelle della luce, essi danno luogo a effetti misurabili"*. (Capra, 1982)

Questa concezione del tempo porta ad abbandonare il concetto di spazio assoluto sostenuto dalla fisica cosiddetta newtoniana che immaginava lo spazio come contenente

una definita configurazione di materia in ogni istante. Tuttavia non possiamo affermare che in un dato istante ci sia una definita quantità di materia nell'universo, poiché la simultaneità è un concetto relativo, strettamente dipendente dallo stato di moto dell'osservatore.

In pratica la teoria della relatività ha dimostrato che i concetti di spazio e di tempo non sono assoluti, bensì relativi. La teoria della relatività portò alla fusione dei concetti di spazio e di tempo: *“insieme con le tre coordinate spaziali, bisogna incorporare il tempo come quarta coordinata che dev'essere specificata in relazione all'osservatore”* (Capra, 1982) Nell'inserire il tempo all'interno delle coordinate spaziali, viene specificato il ruolo dell'osservatore, cioè di un essere che fa esperienza di un dato fenomeno con la propria *coscienza*. All'interno di questa visione, oltre ad aver aggiunto il tempo alle dimensioni spaziali, Einstein inserì un quinto elemento che è passato inosservato per anni: la coscienza. In effetti, l'intera teoria della relatività si basa sulla modificazione della concezione assolutista di spazio e di tempo, in relazione alla diversa esperienza che ne farebbero osservatori (dunque, coscienze) che guardano da prospettive differenti. Potremmo affermare che la differenza sostanziale tra la fisica della relatività e la fisica classica risiede nel fatto che la prima concepisce l'universo attraverso l'osservazione di differenti coscienze che lo esperiscono da molteplici punti di vista, mentre la seconda concepisce la natura a partire da una sola prospettiva assolutista. La relatività si fonda sulla posizione di un differente punto di riferimento, che concepisce l'universo dalla propria prospettiva interna, in modo differente rispetto alla concezione che ne avrebbe un altro osservatore da un'altra collocazione spazio-temporale. All'interno di quest'ottica *“ogni variazione del sistema di coordinate (ovvero ogni variazione della posizione di un sistema percettivo dell'universo) ricombina spazio e tempo in un modo matematicamente ben definito. (...) Spazio e tempo sono profondamente connessi e formano un continuo quadridimensionale chiamato spazio-tempo”* (Capra, 1982)

I concetti di spazio e di tempo sono talmente fondamentali per la descrizione dei fenomeni naturali, che la loro modificazione comporta un cambiamento nell'approccio con cui la scienza descrive la natura. E' inevitabile che tale mutazione comporti diverse implicazioni, anche per quanto concerne la spiegazione della coscienza. Solo negli

ultimi decenni sono state sviluppate delle teorie riguardo la spiegazione della coscienza; è, dunque, comprensibile come, finora, gli studi riguardo le conseguenze della relatività sulla coscienza siano stati abbastanza trascurati. Tuttavia, avendo a disposizione diverse teorie per la comprensione della coscienza, e valutando la possibilità di effettuare calcoli matematici con alcune di esse (com'è possibile fare con la IIT), potrebbe essere giunto il momento di effettuare una prova, al fine di valutare le implicazioni derivanti da una sovrapposizione delle teorie sulla coscienza con le teorie sullo spazio-tempo.

Grazie all'evidente connessione tra le strutture cerebrali e gli aspetti fenomenologici della coscienza, gli studi finora in atto si concentrano prettamente sui correlati neurali (NCC). Ciò non toglie che esista un'altra connessione da prendere in considerazione, derivante proprio da un dato di fatto, ossia da un'assioma: *la coscienza risiede all'interno dello spazio-tempo*. La connessione tra la coscienza e lo spazio-tempo è diretta tanto quanto lo è quella con il proprio substrato fisico, poiché è proprio la connessione della coscienza al tessuto spazio-temporale a farla emergere per mezzo della materia. La materia è intesa come un ripiegamento del tessuto spazio-temporale e quando lo spazio-tempo si “deforma” in modo da produrre informazione integrata, fuoriesce la coscienza.

La coscienza è, dunque, connessa alla materia e allo spazio-tempo in maniera interdipendente. Ed essendo lo spazio ed il tempo misure relative, dobbiamo aspettarci che anche la coscienza assuma valori relativi, in base alle connessioni con il tessuto spazio-temporale.

3.2 La teoria della relatività ristretta

Nel comprendere la relatività bisogna partire dal presupposto che l'universo è pieno di orologi, di innumerevoli tipi diversi.

“Siamo così abituati a guardare il quadrante con le lancette o il display digitale, che tendiamo a vederlo come l'elemento chiave dell'orologio. In realtà l'elemento cruciale è l'oggetto il cui stato cambia in maniera ritmica al passare del tempo.” (Styler, 2012).
L'orologio che molti portano al polso, ad esempio, sfrutta le oscillazioni di un cristallo

di quarzo, che un circuito elettronico elabora per produrre un valore digitale, ma molti altri orologi non hanno un quadrante. *“Il sole, ad esempio, segna 24 ore dal momento in cui si trova all’altezza massima in un certo giorno, a quello in cui raggiunge la stessa altezza il giorno seguente”*. (Styler, 2012)

Il primo principio della relatività riguardò la relatività di moto e fu formulato già dal 1632 da Galileo che descriveva il modo in cui i pesci in un acquario, all’interno di una nave che si muoveva secondo un moto rettilineo uniforme, si muovessero liberamente in tutte le direzioni, proprio come avrebbero fatto se la nave fosse stata ferma.

“Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza, che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d’haver mosche, farfalle e simili animalletti volanti: siavi anco un gran vaso d’acqua, e dentrovi de pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell’acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso; stando ferma la nave osservate diligentemente, come quelli animalletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi gettando all’amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte, che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti. Osservate, che havrete diligentemente tutte queste cose, benchè niun dubbio ci sia, che mentre il vassello stà fermo non debbano succeder così; fate muover la nave con quanta si voglia velocità; che (pur che il moto sia uniforme, e non fluttuante in qua, e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti; nè da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina, o pure stà ferma.” (Galilei, 1632)

Attraverso la sua immaginazione Galileo formulò il principio della relatività di moto, secondo cui un osservatore interno a un contesto di riferimento che si muove secondo un moto rettilineo uniforme, non può accorgersi di essere in movimento, poiché nessun esperimento può consentire di distinguere un sistema di riferimento da un altro che viaggia secondo un moto rettilineo uniforme. In effetti, anche la Terra ruota su se stessa a velocità elevate (circa 1670km/h a livello dell’equatore) e gira intorno al sole a velocità elevatissime (una media di circa 106.000km/h). Inoltre ruota intorno al centro

della Via Lattea a una velocità stimata di circa 792.000Km/h e si muove rispetto al centro dell'universo ad una velocità esorbitante, che supera di gran lunga la velocità di spostamento rispetto al centro della Via Lattea. Tuttavia, nonostante queste elevate velocità, quando sediamo sulla nostra scrivania o compiamo le azioni di tutti i giorni, tutto sembra essere fermo, poiché, secondo il principio di relatività di moto, ciò che conta è il sistema di riferimento. La Terra viaggia a 4 velocità diverse a seconda del sistema di riferimento che prendiamo in considerazione, ma la nostra scrivania è ferma rispetto a noi stessi, come lo sono le mura della nostra stanza o i dipinti appesi sulle pareti, ed è per questo che ci sembra di rimanere fermi.

L'unica eccezione al principio di relatività di moto è data dalla luce, la cui velocità è identica in tutti i sistemi di riferimento, qualunque sia la velocità della sorgente. La velocità della luce è definita con la lettera "c" ed è pari a circa 300.000km/s. Tale velocità rimane invariata a prescindere dal fatto che il fascio di luce provenga da un oggetto fermo o da uno in movimento.

La Teoria della relatività di Einstein si divide in "Teoria della relatività ristretta" e "Teoria della relatività generale". Questa tesi si concentrerà solamente su una parte della relatività ristretta, al fine di comprenderne le possibili relazioni con la Teoria dell'Informazione Integrata di Tononi.

Il professor Daniel Styer racchiude la Relatività ristretta in tre semplici affermazioni:

- *Gli orologi in moto ticchettano lentamente (dilatazione del tempo);*
- *Gli oggetti in moto sono accorciati (contrazione delle lunghezze);*
- *Due orologi in moto verso la stessa direzione non sono sincronizzati (sincronizzazione degli orologi).*

La Teoria della relatività ristretta si divide in tre principi, riassumibili con le tre affermazioni sopra citate. Ciò su cui verterà questa tesi è la *dilatazione del tempo*, secondo cui gli orologi in moto, rispetto a un sistema di riferimento, battono il tempo più lentamente di quelli fermi (sempre rispetto allo stesso sistema di riferimento). Tale principio deriva proprio dall'inestricabile connessione tra spazio e tempo che forma un unico tessuto spazio-temporale.

Quando si è seduti sulla sedia della propria scrivania, si può affermare di essere fermi, tuttavia ciò può essere relativamente vero solo in relazione allo spazio, ma non in relazione al tempo. Quando si è fermi nello spazio, non lo si è anche nel tempo. Anche quando si è immobili, tutti gli orologi continuano a muoversi. Secondo la relatività, quanto più ci si muove nello spazio, tanto meno ci si muove nel tempo. Ciò significa, che un orologio al polso di una persona che cammina, batterà il tempo più lentamente rispetto a un orologio al polso di una persona ferma. Naturalmente gli effetti a tali velocità solo talmente minimi da essere del tutto trascurabili, tuttavia, all'aumentare della velocità con cui si muove un orologio, gli effetti diventano più evidenti.

“Ad esempio, se per i nostri orologi passa un’ora, per un orologio che si muove:

- *A metà della velocità della luce, passano 51,96 minuti;*
- *A 3/5 della velocità della luce, passano 48 minuti;*
- *A 4/5 della velocità della luce, passano 36 minuti;*
- *Al 99% della velocità della luce, passano 8,5 minuti”.* (Styler, 2012)

L'esempio più noto per spiegare la teoria della relatività è sicuramente quello dei due gemelli. Se di una coppia di gemelli uno rimanesse sulla Terra, mentre l'altro partisse per un viaggio a velocità prossime a quelle della luce, al suo rientro il gemello “viaggiatore” risulterebbe più giovane del fratello. Ciò accade perché dal punto di vista del gemello rimasto sulla Terra, gli orologi del fratello viaggiatore battono il tempo più lentamente. *“Il battito del cuore, il flusso del sangue, le onde cerebrali, ecc risulterebbero rallentati durante il viaggio”.* (Capra, 1982) Naturalmente il viaggiatore non si renderebbe conto della lentezza con cui passa il tempo, poiché dal suo punto di riferimento tutto rimane invariato; tuttavia, al suo ritorno, troverebbe il fratello più vecchio.

Le prove a sostegno della relatività sono prettamente di due diversi tipi: quelle che fanno viaggiare a velocità elevate orologi artificiali accuratissimi e quelle svolte, invece, con orologi naturali come le particelle subatomiche che viaggiano a velocità prossime a quelle della luce.

Ad esempio, una particella chiamata “muone” è una sorta di orologio, poiché, una volta creato, vive $2,198 \pm 0.002$ microsecondi, poi decade in un elettrone. Ciò, però, accade solo quando il muone è fermo rispetto al laboratorio. In un esperimento del CERN, i muoni erano in movimento con velocità $V=0,999418c$ rispetto al laboratorio e la durata della loro vita media risultava di $64,37 \pm 0,03$ microsecondi. (Styler, 2012) Ciò non significa che cambia la vita reale della particella, perché la sua vita media, dal suo punto di vista, sarà sempre la stessa; ma dal punto di vista dell’osservatore nel laboratorio, l’orologio interno della particella ha rallentato, facendo sembrare la sua vita media “dilatata” rispetto all’osservatore stesso.

E’ possibile comprendere con molta facilità la relazione di dilatazione del tempo con una semplice formula, derivante dalle *trasformazioni di Lorenz*, le quali descrivono in che modo cambiano velocità, distanze e tempi tra un sistema di riferimento inerziale e uno in moto rettilineo uniforme rispetto ad esso. In altre parole, spiega in che misura all’aumentare della velocità di un oggetto (rispetto al nostro sistema di riferimento) il tempo si dilata. La formula è la seguente:

$$T_0 = T \sqrt{1 - (V/c)^2}$$

Dove T_0 è il Tempo che passa dal punto di vista di un orologio nel suo riferimento, T è il Tempo che passa dal punto di vista dell’orologio in movimento rispetto all’orologio fermo all’interno del sistema di riferimento considerato, V è la velocità alla quale viaggia l’orologio e c è la velocità della luce. Da tale formula possiamo ricavare la formula inversa per trovare T :

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}$$

Per fare un esempio, torniamo all’affermazione fatta precedentemente, secondo cui se si viaggia a $3/5$ di c , il tempo scorre più lentamente rispetto al proprio sistema di riferimento. Ciò significa che:

$$T_0 = 60\text{min} \cdot \sqrt{1 - (3/5 \cdot c)^2} = 60\text{min} \cdot 0,8 = 48 \text{ min}$$

Come previsto in precedenza, un'ora, dal punto di vista di un orologio che viaggia a $\frac{3}{5}$ di c , equivale a 48 minuti. In altre parole, se sincronizzassimo gli orologi con un nostro amico che parte per un viaggio ad una velocità pari a $\frac{3}{5}$ di quella della luce, e se tornasse dopo un'ora (del nostro orologio), per lui sarebbero passati solo 48 minuti. Effettivamente il nostro orologio segnerebbe 60 minuti, mentre quello del nostro amico 48 minuti. Ciò non vale solo per l'orologio che porta al polso, ma anche per il suo orologio biologico. Egli, infatti, risulterebbe più giovane di 12 minuti e, molto probabilmente, avrebbe un'esperienza cosciente di 12 minuti in meno rispetto alla nostra.

Per fare un esempio del calcolo di T , possiamo, invece, partire dal calcolo della vita del muone, ma questa volta non rispetto al proprio riferimento, ma in relazione ad un osservatore esterno, rispetto al quale si muove. La vita media del muone equivale a $2,198 \pm 0,002$ microsecondi, dunque, se questo viaggiasse ad una velocità di $V=0,999418c$ (velocità raggiunta nei laboratori del CERN) dovremmo aspettarci che:

$$T = \frac{2,198 \pm 0,002}{\sqrt{1 - (0,999418)^2}} = 64,43 \pm 0,06$$

In effetti la vita media misurata dei muoni in movimento, a tale velocità, è stata proprio di $64,37 \pm 0,03$. Ciò non significa che il muone vive più a lungo, poiché dal proprio punto di riferimento (T_0) la sua vita media rimane del tutto invariata, tuttavia dal punto di vista di un osservatore esterno (rispetto al quale il muone si muove) la sua vita sembrerà più lunga perché il tempo, a tali velocità, è palesemente dilatato.

Questo elaborato si propone di trovare una congiunzione tra gli effetti della Teoria della relatività (e in particolar modo della *dilatazione del tempo*) e la Teoria dell'Informazione Integrata di Tononi, partendo dal presupposto che l'identificazione di un substrato fisico della coscienza, comporti un'inevitabile modificazione della coscienza stessa in relazione alla struttura dello spazio-tempo.

4. UNA COSCIENZA RELATIVISTICA: UNO SGUARDO OLTRE LA SCATOLA CRANICA

4.1 La coscienza all'interno dello spazio-tempo: una prospettiva relativistica

La teoria dell'informazione integrata tende a comprendere la coscienza sulla base del funzionamento dei suoi correlati neurali. In quest'ottica la coscienza è ciò che deriva dal funzionamento della materia. Quando la materia assume una certa conformazione fisica e un determinato funzionamento, concepisce uno stato cosciente. Allo stesso modo, possiamo affermare che ad ogni conformazione materiale (che produce informazione integrata), corrisponde uno stato di coscienza. Quanto più la materia assume un'organizzazione volta a produrre una quantità elevata d'informazione integrata, tanto più il sistema sarà cosciente.

Almeno per adesso, non è compito della scienza rispondere a *perché* tutto ciò accada, bensì analizzare attentamente *in che modo*.

Concepire la coscienza come informazione integrata, comporta numerose ripercussioni. Le neuroscienze hanno, ormai, accertato che vi è un'ampia correlazione tra il funzionamento di specifiche aree cerebrali e lo svolgimento di determinate attività legate alla coscienza. Tutto ciò che riguarda l'esperienza cosciente, come guardare un volto o immaginare di camminare nella propria casa, ha un corrispettivo fisico, riscontrabile nel funzionamento cerebrale. Il cervello sembra essere il punto di congiunzione tra il contenuto astratto dei pensieri e la fisicità del mondo.

Utilizzando l'EEG, ad esempio, è possibile rilevare un evidente cambiamento nella frequenza di scarica dei neuroni quando il soggetto analizzato è in uno stato di sonno profondo, rispetto a quando si trova in uno stato di veglia. (Tononi, 2013)

Utilizzando la TMS in relazione all'EEG, è evidente come la risposta del cervello a uno stimolo elettrico proveniente dall'esterno, si diversifica in base allo stato cosciente del soggetto al momento della scarica. Se il soggetto dorme, la scarica è indifferenziata e casuale, mentre quando è attivo, la risposta è differenziata e organizzata. (Tononi, 2013)

Le attuali neuroscienze sembrano fornire una quantità elevata di prove empiriche a favore della correlazione tra il funzionamento della materia (organizzata sotto forma di sistema cerebrale) e i contenuti della coscienza. Un'affermazione di questo tipo comporta diverse conseguenze. Tra queste, è particolarmente interessante pensare a cosa succede quando poniamo in relazione la coscienza con gli effetti legati alla teoria della relatività ristretta e, in particolar modo alla dilatazione del tempo. Che cosa accade alla coscienza quando entrano in gioco le forze della relatività? I livelli di coscienza si modificano in base alla velocità alla quale viaggia un sistema che produce informazione integrata? Esiste una velocità limite oltre la quale la coscienza non può esistere?

Concepire la coscienza come derivante dalla materia, comporta la necessità di analizzare attentamente tutte le conseguenze che ne derivano. Se si tratta la coscienza come derivante da una particolare conformazione della materia, è doveroso comprendere a fondo la situazione, analizzandone anche le eventuali conseguenze che l'applicazione di leggi, già ampiamente note nella Fisica, potrebbe avere sulla coscienza, la quale, ormai, non può più essere trattata come un oggetto isolato e scollegato da tutto il resto dell'universo.

Già nel 2003, Tononi poneva in essere dei dubbi sul ruolo dello spazio e del tempo riguardo la coscienza. Era, infatti, incerto sullo spazio dimensionale degli elementi, nonché sul lasso di tempo (da lui definito *grana temporale*) da prendere in considerazione per il calcolo del PHI. *“Abbiamo fatto un gran parlare di complessi, complessità, midpartizioni, di sotto insiemi, di elementi e via dicendo, ma non ci siamo mai presi il disturbo di specificare se gli elementi in questione siano atomi, molecole, cellule, aree cerebrali, interi cervelli, interi organismi, città, pianeti, stelle. Peggio, non abbiamo neppure speso una parola per discutere un'importante questione teorica: se il repertorio di stati su cui misuriamo la complessità vada valutato in tempi corrispondenti a frazioni di secondo, a minuti, a giorni o ad anni”*. (Tononi 2003) Il dilemma di fronte al quale si trovò Tononi nel 2003, sembra essere lo stesso che ha alimentato la stesura di questo elaborato. Il problema di fondo è comprendere a quali scale spaziali e temporali identificare i complessi della Teoria dell'Informazione Integrata, poiché i valori di ϕ variano in relazione a questi riferimenti. Tononi uscì da tale dilemma affermando che le scale in cui i livelli di complessità risultano essere

massimi, dovrebbero rappresentare le scale più adatte per suddividere il sistema. Ciò significa che, secondo la IIT, i massimi livelli di Informazione Integrata si raggiungono prendendo in considerazione una scala spaziale relativa al funzionamento dei neuroni (e non di atomi o stelle) e una scala temporale compresa tra una frazione di secondo e un massimo di 2-3 secondi (e non di miliardesimi di secondo o di millenni). *“Ad esempio, se la complessità raggiungesse il valore massimo considerando neuroni singoli, anziché minicolonne di neuroni, questi ultimi costituirebbero le unità elementari dell'integrazione dell'informazione nella corteccia.(...) La stessa logica vale per la grana temporale. I neuroni hanno precise caratteristiche biofisiche, tra cui una certa velocità di trasmissione degli impulsi nervosi e una certa velocità di risposta agli impulsi ricevuti. (...) Se perturbassimo il cervello facendo passare solo un milionesimo di secondo, non succederebbe proprio nulla. (...) Esisterà, dunque, una costante di tempo, caratteristica del cervello, necessaria perché si possano manifestare compiutamente le interazioni tra le sue varie parti”* (Tononi, 2003).

Considerando che si parla di tempo, una domanda viene spontanea: perché i calcoli sul Φ non tengono in considerazione tale misura? Perché la complessità viene misurata sulla base dell'organizzazione spaziale dei complessi senza prendere in considerazione il tempo?

Con grande stupore ho appreso come, anche Tononi si sia già posto questa domanda:

“E' più plausibile che la coscienza sia misurata dalla complessità pura e semplice, o non invece dalla complessità nell'unità di tempo? E' informazione integrata o velocità d'integrazione dell'informazione?(...) Nel primo caso, due sistemi dotati della stessa organizzazione, ma uno mille volte più lento dell'altro, avrebbero la stessa quantità di coscienza, anche se l'esperienza cosciente scorresse a velocità diversa nei due sistemi. Se invece la coscienza corrispondesse alla complessità nell'unità di tempo, seguirebbe che il primo sistema è mille volte più cosciente rispetto al secondo, perché riesce ad integrare la stessa quantità d'informazione più rapidamente.(...) Ma non tutte le domande possono avere risposta in tempi brevi”.

Attualmente il calcolo del Φ è effettuato sulla base della conformazione spaziale inerente un complesso il cui insieme è superiore alla somma delle singole parti che lo

compongono. Ciò esclude in parte il tempo, poiché dalla sola conformazione spaziale possiamo trarre un calcolo del PHI. Tuttavia, rimane comunque la nozione di tempo, in quanto, i livelli d'informazione variano in relazione a quanto lo stato attuale di un sistema vincola gli stati passati e futuri del sistema stesso. Anche l'integrazione genera una quantità d'informazione proporzionale alla quantità di vincoli causali imposti dal passato e dal futuro del complesso. Dunque, pur non essendo calcolato il ϕ nell'unità di tempo, esso è strettamente connesso al passato, al presente e al futuro di un sistema.

E' innegabile che il tempo svolga un valore centrale nello sviluppo della coscienza. Ciò è ancor più deducibile, partendo da un semplice assioma: se il tempo non scorresse, la coscienza non potrebbe evolversi (a meno che non si consideri lo scorrere del tempo come la conseguenza del movimento della coscienza all'interno di un tempo fermo). Inoltre, se il tempo fosse fermo, le strutture cerebrali non funzionerebbero e la quantità d'informazione integrata sarebbe pari a zero. Lo scorrere del tempo sembra un requisito fondamentale per l'esistenza della coscienza, per come siamo soliti concepire l'universo. Un tempo fermo, significherebbe che nessun cancello logico potrebbe inviare input all'altro; tantomeno che lo stato passato di un sistema possa vincolare quello futuro per generare informazione.

La dipendenza della coscienza dalla dimensione temporale, ci pone di fronte alla necessità di misurare la coscienza anche nell'unità di tempo, oltre che in relazione alla sua conformazione spaziale.

4.2 La coscienza nell'unità di tempo: un ϕ relativo?

Il paradosso dei gemelli è stato sicuramente uno dei più discussi della fisica. Esso prende in considerazione due gemelli, dei quali uno rimane sulla Terra, mentre l'altro parte per un viaggio a una velocità prossima a quella della luce. Al suo ritorno, il gemello viaggiatore troverà il fratello più vecchio rispetto a lui. Ciò dipende dagli effetti della relatività, che comportano un rallentamento dello scorrere del tempo proporzionale alla velocità con la quale si muove un sistema.

Per fare un esempio più concreto prendiamo in considerazione due gemelli. Il primo, Giulio, fa un viaggio a una velocità pari all'86,6% di quella della luce, mentre suo fratello, Albert, preferisce rimanere sulla Terra.

Albert attende molti anni, e, finalmente, dopo 20 anni vede Giulio atterrare sulla Terra. Ma al suo rientro nota qualcosa di strano: Giulio è molto più giovane di lui! Anche Giulio si stupisce nel vedere Albert così vecchio, considerando che dall'inizio del suo viaggio, per lui, sono passati solo 10 anni e non 20. Albert ricorda di aver salutato Giulio 20 anni fa, mentre Giulio ricorda di averlo salutato solo 10 anni fa.

Tutto ciò è spiegabile attraverso gli effetti della relatività. L'enorme velocità alla quale ha viaggiato Giulio (eliminando accelerazioni e decelerazioni per aumentare la chiarezza dei calcoli) ha comportato una dilatazione del tempo trascorso per lui rispetto a quello trascorso per Albert. Ciò è spiegabile attraverso un semplice calcolo matematico:

$$T_0(\text{Giulio}) = T_{(\text{Albert})} \sqrt{1 - (V/c)^2}$$

$$T_0 = 20 \cdot \sqrt{1 - (0,866c)^2}$$

$$T_0 = 20 \cdot \sqrt{1 - 0,749956}$$

$$T_0 = 20 \cdot 0,5$$

$$T_0 = 10$$

T_0 è il tempo che passa nel riferimento di Giulio che è in movimento a una velocità pari all'86,6% di c . T è, invece, il tempo che passa per Albert mentre aspetta suo fratello sulla Terra. Adesso tutto è più chiaro per quanto concerne l'età, tuttavia Albert e Giulio non riescono a mettersi d'accordo su un quesito: Albert afferma di essere stato più cosciente di Giulio perché ha avuto più tempo per integrare informazioni, dunque, il ϕ da lui prodotto è superiore; Giulio, invece, afferma che il ϕ non è quantificato sull'unità di tempo, dunque il loro livello di coscienza rimane il medesimo.

Entrambi, però, concordano sul fatto che Giulio ha esperito, quantitativamente, più esperienza cosciente di Albert. Gli effetti della relatività, infatti, non solo hanno agito sugli orologi che i due portavano ai polsi, ma anche sui loro orologi biologici e perfino sul loro funzionamento cerebrale. Nonostante ciò, Giulio non ha affatto sentito che la

sua mente viaggiasse più lentamente perché, dal suo punto di vista, il tempo non ha smesso di scorrere in maniera fluente.

Attualmente sappiamo che l'esperienza cosciente di Giulio è durata meno rispetto a quella di Albert, dunque dovremmo aspettarci che calcolando il ϕ nell'unità di tempo, il ϕ_{UT} di Giulio risulti inferiore di quello di Albert.

Riprendiamo la figura dell'integrazione e, per semplicità di calcolo, immaginiamo un caso ideale in cui il ϕ rimanga costante nel tempo; ciò significa che Albert non dorma per 20 anni e che Giulio faccia lo stesso per 10 anni. Immaginiamo, inoltre, di prendere in considerazione 3 neuroni nel cervello di Albert e 3 neuroni in quello di Giulio e presupponiamo che funzionino in modo analogo, al fine di formare lo stesso valore di ϕ . Come affermato nella spiegazione del postulato dell'integrazione, "la quantità totale di informazione integrata del meccanismo ABC nel suo stato attuale è il minimo della sua informazione integrata passata e futura e viene definita ϕ^{MIP} ", dove MIP indica il Partizionamento Minimo dell'Informazione, qualora decidessimo di eseguire una partizione del meccanismo.

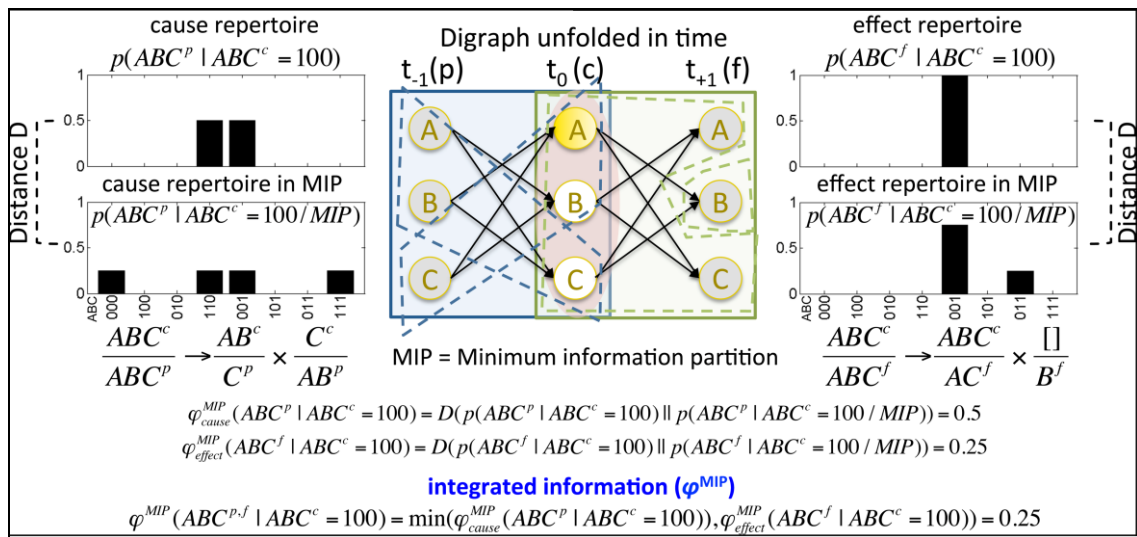


Figura 14. ϕ^{MIP} di Galileo in un sistema stazionario

Considerando che Albert sia fermo rispetto a Giulio, il suo valore di ϕ^{MIP} è uguale a 0,25. Ipotizzando che l'intero meccanismo derivi da 1 secondo di attività, e che la sua attività sia costante, potremmo considerare il ϕ^{MIP} nell'unità di tempo che chiameremo ϕ_{UT} . Avremo, quindi che:

$$\Phi_{UT} = \Phi^{MIP} \cdot t$$

Che nell'arco di un secondo equivale a:

$$\Phi_{UT} = 0,25 \cdot 1sec = 0,25\phi/sec$$

Nel caso di Albert, il quale è in un sistema stazionario rispetto a Giulio, $\Phi_{UT} = 0,25 \phi/sec$ come indicato nell'ultimo calcolo riportato in figura. Nell'arco di un secondo il valore rimane invariato, ma nell'arco di 20 anni, ipotizzando che non vi siano mai variazioni, il valore dell'informazione integrata considerata nell'unità di tempo in un sistema stazionario è pari a Φ^{MIP} moltiplicato per i secondi contenuti in 20 anni, ossia 630.720.000. Il valore di ϕ nell'unità di tempo (Φ_{UT}) equivale a:

$$\Phi_{UT} = 0,25\phi/sec \cdot 630.720.000sec = 157.680.000$$

In questo modo si ottiene il valore dell'informazione integrata calcolata nell'unità di tempo di Albert, il quale è fermo sulla Terra rispetto a Giulio.

Per Giulio, invece, la situazione è diversa poiché, muovendosi all'86,6% della velocità della luce, bisogna considerare la dilatazione temporale derivante dagli effetti descritti nella relatività ristretta di Einstein.

Per Giulio, nel calcolo dell'informazione integrata nell'unità di tempo, si deve prendere in considerazione la formula della dilatazione temporale. In questo modo avremo che:

$$\Phi_{UT} = \Phi^{MIP} \cdot \left[t \cdot \sqrt{1 - (V/c)^2} \right]$$

Dove Φ^{MIP} è l'informazione integrata, t il tempo, V la velocità alla quale viaggia un sistema e c la velocità della luce.

Ciò significa che nel caso in essere, Giulio che viaggia rispetto a Albert a una velocità pari all'86,6% di quella della luce, avrà una coscienza nell'unità di tempo (Φ_{UT}) pari a quella di Albert, ma moltiplicata per la dilatazione del tempo:

$$\Phi_{UT} = 0,25 \cdot \left[630.720.000 \cdot \sqrt{1 - (0,866)^2} \right] = 78.840.000$$

Dal punto di vista di Albert, Giulio produce una quantità d'informazione integrata nell'unità di tempo pari a $78.840.000\phi_{UT}$, ossia, la metà del valore di Albert. Tale calcolo è stato eseguito prendendo in considerazione una velocità V pari all'86,6% di c (velocità alla quale il tempo scorre circa il doppio più lentamente), ma possiamo eseguire l'operazione con qualsiasi altra velocità, anche con quelle più comuni; tuttavia gli effetti sarebbero così piccoli, da risultare irrilevanti.

Ricapitolando, se si considera l'informazione integrata nell'unità di tempo, il suo valore si modifica in relazione alla velocità alla quale viaggia un sistema cosciente. Ciò comporta una concezione relativistica della coscienza, la quale non è costante in tutti i sistemi di riferimento, ma si modifica in relazione alla sua posizione nello spazio-tempo.

Se non ci si limita a studiare la scatola cranica, si può osservare come la coscienza sia immersa in un universo dinamico all'interno del quale si muove continuamente. Anche se a velocità ordinarie gli effetti della relatività sulla coscienza sono limitati, se consideriamo grandezze dell'ordine di anni luce e velocità elevate, le implicazioni della relatività possono diventare evidenti.

“Quando studiamo l'universo nel suo insieme, con i suoi milioni di galassie, raggiungiamo la massima scala di spazio e tempo; a quel livello cosmico, scopriamo che l'universo non è statico, bensì in continua espansione. (...) La velocità di recessione di ogni galassia che osserviamo è proporzionale alla distanza della galassia stessa. Quanto più essa è distante, tanto più velocemente si allontana da noi. In qualsiasi galassia vi capitasse di trovarvi, osservereste le galassie allontanarsi da voi: le galassie più vicine si allontanerebbero alla velocità di alcune migliaia di chilometri al secondo, le più lontane a velocità superiori, e quelle lontanissime a velocità prossime (o superiori) a quelle della luce”.

Se consideriamo la coscienza nell'unità di tempo, ne consegue che il suo livello vari in relazione allo spazio-tempo e, più precisamente, alla quantità di tempo di elaborazione. Essendo il tempo un elemento relativo, anche i valori di coscienza nel tempo tendono a diventare relativi. Inoltre, se si considera che il nostro universo è in espansione e che galassie lontanissime dalla nostra si allontanano a velocità prossime, o superiori, a

quella della luce, dobbiamo aspettarci che i livelli di coscienza nell'unità di tempo (Φ_{UT}), di eventuali coscienze presenti su tali galassie, siano tanto più bassi quanto più si trovano lontani. Ciò significa che quanto più ci si allontana dal nostro punto di riferimento, tanto più la coscienza nell'unità di tempo diminuisce. Ma l'aspetto più interessante di tale situazione sembra essere che ciò non è valido solo per una coscienza che si trova sulla Terra, ma anche per un eventuale coscienza che si trovi su qualsiasi altra galassia. Cambiando il punto di riferimento, varia la quantità di coscienza nell'unità di tempo. Nel 2003 Tononi scriveva che *“Se la complessità è coscienza, non può certo avere un valore arbitrario! Non può essere che quanto io sia cosciente, in questo preciso istante, vari a seconda di come scegliamo le unità di spazio e di tempo. Galileo è cosciente e basta, indipendentemente dalle unità di riferimento!”*

In realtà Tononi aveva ragione nell'affermare ciò, poiché la sua concezione di coscienza non si sviluppava nell'unità di tempo, ma semplicemente nell'informazione integrata prodotta da un sistema grazie alla sua struttura fisico-funzionale. Tuttavia, se consideriamo la coscienza nell'unità di tempo, non possiamo più parlare di una coscienza assoluta, bensì di una *coscienza relativa*. Albert, quindi, non è cosciente indipendentemente dalle unità di riferimento, poiché se Giulio fosse su una Galassia lontanissima, vedrebbe Albert sulla Terra viaggiare a velocità prossime a quelle della luce e potrebbe facilmente apprendere come il suo livello di coscienza nell'unità di tempo sia inferiore al suo. Allo stesso modo, Albert, dal suo punto di vista, vedrebbe Giulio allontanarsi a velocità elevatissime e calcolerebbe come i livelli di coscienza nell'unità di tempo di Giulio siano più bassi rispetto ai propri.

Per comprendere meglio la situazione è particolarmente utile affrontare la questione con un approccio matematico. Considerando una galassia molto distante che si muove, rispetto alla Terra, a velocità prossime a quelle della luce, e ipotizzando di collocare un sistema che integra informazioni su tale galassia, si può calcolare numericamente la variazione dei livelli di coscienza nell'unità di tempo (Φ_{UT}).

La galassia 3C 295 è un quasar che emana radiazioni molto intense ed è stata scoperta nel 1960. Il nome deriva dall'essere il 295° oggetto elencato nel Terzo catalogo di radiosorgenti di Cambridge.

La distanza delle galassie viene stimata considerando il *redshift*, ossia un fenomeno per cui la luce o un'altra radiazione elettromagnetica emessa da un oggetto, ha una lunghezza d'onda maggiore rispetto a quella che aveva all'emissione. Ciò significa che, se, ad esempio, una galassia molto lontana emana una luce di colore blu, nel corso del tempo, all'aumentare della distanza, tale luminosità tenderà a diventare rossa.

Il redshift della galassia 3C 295 è pari a $z = 0,461$ (Matt J. Jarvis, 2001). Per z inferiori a 1 si può calcolare la velocità con la seguente formula:

$$V = z \cdot c$$

Avremo, dunque, che la velocità “V” della galassia 3C 295 è di:

$$V = 0,461 \cdot 300.000\text{Km/sec} = 138.300\text{Km/sec}$$

Albert si trova sulla Terra, mentre Giulio è sulla galassia 3C-295. Nonostante si trovino su due pianeti differenti, ognuno di essi decide di suonare il piano. Suonano entrambi la stessa canzone “Sweetwater” di Ramin Djawadi la cui durata è di circa 3 minuti (180 sec). Si ipotizzi che, mentre Albert (che è sulla Terra) suona, alcuni dei suoi neuroni integrino una quantità d'informazione integrata nell'unità di tempo $\phi_{UT}=0,25/\text{sec}$. Giulio, invece, si trova su un pianeta della galassia 3C-295 e, mentre suona, alcuni dei suoi neuroni integrano la stessa quantità d'informazione (0,25/sec).

Albert è sulla Terra, dunque, il calcolo del ϕ nell'unità di tempo è, come al solito:

$$\phi_{UT} = \phi^{MIP} \cdot t = 0,25 \cdot 180\text{sec} = 45$$

Per Giulio, invece, la situazione è differente, poiché nel riferimento di Albert, egli si sposta, insieme alla sua Galassia, ad una velocità di 138.300Km/sec. Ciò comporta una dilatazione del tempo, e, di conseguenza, una diminuzione della quantità di informazione integrata nell'unità di tempo calcolabile nel seguente modo:

$$\phi_{UT} = \phi^{MIP} \cdot \left[t \cdot \sqrt{1 - (V/c)^2} \right]$$

Siccome la velocità “V” nel calcolo di allontanamento delle galassie è uguale a $V=zc$, possiamo sostituire la V con “zc” (quando z è inferiore a 1). Si avrà, dunque:

$$\Phi_{UT} = \phi^{MIP} \cdot \left[t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{z \cdot c}{c} \right)^2} \right]$$

Infine, semplificando, rimane:

$$\Phi_{UT} = \phi^{MIP} \cdot (t \cdot \sqrt{1 - z^2})$$

Dove ϕ^{MIP} è la quantità d'informazione integrata, t il tempo e z il valore stimato del redshift. Tutto ciò che è dentro la parentesi rappresenta, nell'insieme, quanto tempo passa rispetto ai 180 secondi di Albert in relazione alla velocità con cui ci si sposta rispetto ad esso.

Se dalla Terra Albert volesse sapere quanta informazione nell'unità di tempo sta integrando Giulio rispetto a se stesso mentre suona il piano, dovrebbe eseguire il seguente calcolo:

$$\Phi_{UT} = 0,25 \cdot (180 \cdot \sqrt{1 - 0,461^2}) = 0,25 \cdot (180 \cdot 0,8874) = 0,25 \cdot 159,732 = 39,933$$

Giulio ha un $\Phi_{UT}=39,933$ rispetto a Albert che ha un $\Phi_{UT}=45$ (considerando che Albert si trovi in un sistema stazionario nel riferimento di Giulio). Non solo la quantità dell'informazione integrata nell'unità di tempo è inferiore in Giulio rispetto ad Albert, ma dobbiamo anche considerare che quando Galileo ha concluso la sinfonia (al 180° secondo), Giulio, rispetto a Galileo, si troverà a poco più del 159°. Ciò significa che rispetto a Galileo, Giulio avrà suonato circa 20 secondi in meno e avrà integrato una quantità d'informazione integrata nell'unità di tempo in meno di 5,067 Φ_{UT} .

Alcune galassie si allontanano dalla nostra a velocità superiori a quelle della luce, ciò significa che otterremmo livelli di Φ_{UT} negativi, ipotizzando che vi siano sistemi simili ai nostri che integrano informazioni. Ma più che di valori negativi di Φ_{UT} , in realtà, con velocità superiori a quelle della luce, la formula della dilatazione del tempo si ritroverebbe ad avere un valore negativo sotto radice, il che è di difficile interpretazione. Ciò non significa che sistemi coscienti lontani da noi siano meno sviluppati, ma semplicemente che il loro tempo, rispetto al nostro, passa più lentamente a causa della dilatazione del tempo e che, di conseguenza, anche i livelli di Φ_{UT} sono inferiori.

Potrebbe esistere, dunque, un “*orizzonte degli eventi coscienti*” oltre il quale i livelli di Φ_{UT} raggiungono lo zero e iniziano a decrescere. Matematicamente potrebbe essere possibile individuare quest’orizzonte degli eventi coscienti trovando la distanza oltre la quale l’universo intorno a noi inizia a espandersi ad una velocità pari a quella della Luce. In quel caso, infatti avremmo che:

$$\Phi_{UT=0} = \phi^{MIP} \cdot \left[t \cdot \sqrt{1 - (c/c)^2} \right] = \phi^{MIP} \cdot (\sqrt{1-1}) = \phi^{MIP} \cdot 0 = 0$$

Bisogna considerare, inoltre, che l’orizzonte degli eventi coscienti non sia stabile e stazionario, bensì in continua espansione, fintantoché la velocità con cui si espandono le galassie continua ad aumentare.

Inoltre bisogna tener conto del fatto che “*qualunque sia la galassia nella quale un osservatore si trovi, tutte le altre galassie si allontaneranno da lui*” (Capra, 1982). Ciò significa che la posizione dell’orizzonte degli eventi coscienti si modifica in relazione alla posizione di un osservatore. In altre parole un osservatore dalla Terra dovrà considerare l’orizzonte degli eventi coscienti rispetto alla Terra, mentre un osservatore presente in un’altra galassia dovrà considerare l’orizzonte degli eventi coscienti in relazione al proprio riferimento. L’orizzonte degli eventi coscienti parte dalla distanza oltre la quale l’espansione dell’universo eguaglia la velocità della luce c .

Uno schema potrebbe chiarire meglio la situazione:

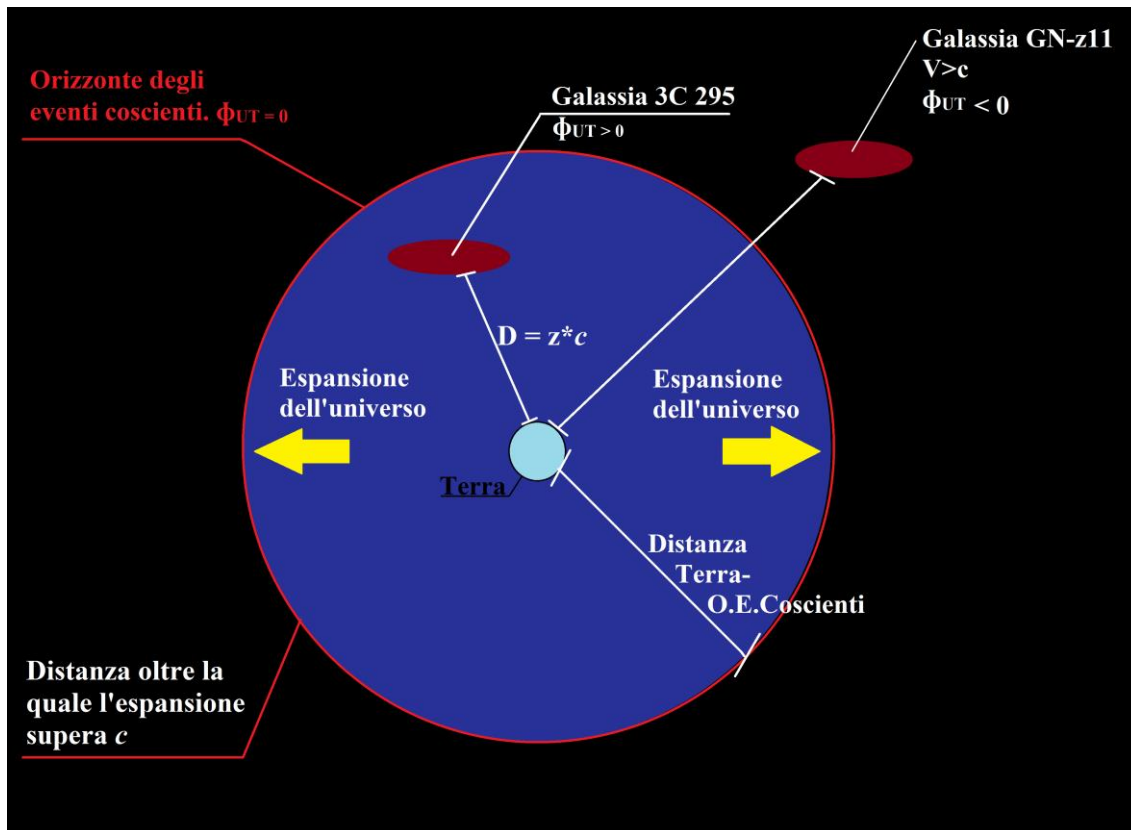


Figura 15. Orizzonte degli eventi coscienti rispetto alla Terra

Nella figura 11 viene schematizzato l'orizzonte degli eventi coscienti in relazione al punto di vista di un osservatore terrestre. Si può osservare come la Galassia 3C-295 sia all'interno del cerchio rosso, ciò significa che il livello di coscienza misurato nell'unità di tempo (Φ_{UT}) è maggiore di zero, poiché la velocità con la quale tale galassia si muove rispetto alla Terra è inferiore a quella della luce. In prossimità della linea rossa, invece, le galassie si spostano alla velocità della luce, ciò significa, che dal nostro punto di vista, il tempo per loro è fermo e anche il livello di Φ_{UT} sarà uguale a zero. Infine, nel caso della Galassia Gn-z11 la situazione è ben diversa, poiché questa si allontana dalla Terra a velocità superiori a quelle della luce. Ciò significa che il tempo, rispetto al nostro punto di riferimento, avrà un valore negativo; di conseguenza anche la coscienza misurata nell'unità di tempo potrebbe assumere un valore inferiore allo zero, di non facile interpretazione per come siamo abituati a concepire ordinariamente l'esperienza cosciente.

L'utilizzo del solo principio della dilatazione del tempo è restrittivo per comprendere appieno questo fenomeno, poiché, per risolvere tutti i vari paradossi derivanti da tale

applicazione, sarebbe necessario considerare i principi della *contrazione delle lunghezze* e della *sincronizzazione degli orologi*, nonché altri fenomeni derivanti dalla *relatività generale*. Per mancanza di tempo non saranno considerati in questo elaborato altri principi, ma, sicuramente, sarà possibile approfondire la questione e risolvere eventuali paradossi con una visione che guardi oltre la dilatazione temporale.

CONCLUSIONI

La coscienza non è un fenomeno spiegabile solo attraverso considerazioni filosofiche e prospettive religiose, ma anche per mezzo di un approccio scientifico affine agli ambiti delle neuroscienze e della fisica. Attualmente le localizzazioni cerebrali, infatti, riescono a conferire una collocazione alla coscienza. Il sistema talamo-corticale sembra essere la struttura più conforme allo sviluppo della coscienza, poiché il suo funzionamento si distingue da quello cerebellare grazie alla diversa organizzazione neuronale. Nonostante nel cervelletto siano presenti più neuroni rispetto alla corteccia cerebrale, è solo in quest'ultima che troviamo le strutture predisposte allo sviluppo della coscienza. Ciò significa che non è il numero di neuroni a generare coscienza, bensì la loro attività funzionale. E' stato evidenziato che mentre nel cervelletto i neuroni sembrano organizzati in strutture indipendenti, nella corteccia cerebrale essi formano un insieme funzionale, la cui totalità è superiore alla somma delle singole parti che formano il sistema. La Teoria dell'Informazione Integrata (IIT) di Tononi concepisce la coscienza come *Informazione Integrata* e offre una prospettiva che consente di approcciarsi in maniera matematica a tale argomento. Essa parte da cinque assiomi fondamentali (*esistenza, composizione, informazione, integrazione ed esclusione*) derivanti dal mondo della fenomenologia e trasforma questi assunti in postulati, partendo dal presupposto che fenomeni prettamente soggettivi della coscienza possano trovare un riscontro funzionale all'interno dell'organizzazione cerebrale.

La IIT trova numerosi riscontri nell'ambito clinico. Infatti, attraverso la congiunzione tra l'EEG e la TMS si può determinare se un paziente è cosciente o meno (anche se è del tutto immobilizzato) interpretando i risultati dei test con gli assunti teorici della IIT. Si può perturbare il sistema cerebrale con la Stimolazione Magnetica Transcranica e registrare la risposta con l'Elettroencefalogramma. Se la risposta è integrata e differenziata (cioè complessa) significa che il sistema è cosciente, viceversa il sistema non 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 risvolti etici di tale approccio comportano la responsabilità di approfondire le conoscenze riguardo il fenomeno della coscienza.

La IIT è una delle poche teorie che va al di là della scatola cranica, concependo la coscienza come informazione integrata, derivante da particolari stati funzionali della materia relazionati allo spazio e al tempo. Non è del tutto scontato scegliere la localizzazione spaziale e il lasso temporale necessari per integrare informazioni. La scala spaziale e temporale è scelta in relazione alla quantità di informazione integrata massima disponibile tra le diverse scale possibili. Secondo la IIT, la scala spaziale che sembra essere più affine alla produzione di informazione integrata sembra essere a livello dei neuroni, mentre quella temporale sembra riguardare “grane temporali” che variano da frazioni di secondo fino a 2-3 secondi. Tuttavia il calcolo dell’Informazione Integrata non è effettuato considerando l’unità di tempo, ma valutando la mappatura delle connessioni e la quantità d’informazioni che lo stato attuale di un sistema fornisce riguardo ai suoi stati passati e futuri.

Se non si considera la coscienza nell’unità di tempo, prendendo in considerazione due sistemi che integrano la stessa quantità d’informazione, ma in lassi temporali diversi, dovremmo affermare che hanno lo stesso livello di coscienza, anche se uno di essi impiegasse il doppio del tempo dell’altro.

In questo elaborato si è ipotizzato, invece, un calcolo dell’informazione integrata nell’unità di tempo (Φ_{UT}) e si è visto come i livelli varino in relazione agli effetti della relatività. Considerando due sistemi coscienti che integrano la stessa quantità d’informazione, e ipotizzando che uno di essi si muova a velocità molto elevate, l’informazione integrata considerata nell’unità di tempo sarà minore nel sistema in movimento. Ciò è spiegabile per mezzo degli effetti della dilatazione del tempo derivante dalla Teoria della Relatività. Il valore dell’informazione integrata nell’unità di tempo di un sistema in moto relativo, rispetto a un sistema cosciente in un sistema stazionario sarà pari a:

$$\Phi_{UT} = \Phi^{MIP} \cdot \left[t \cdot \sqrt{1 - (V/c)^2} \right]$$

Dove Φ^{MIP} è la quantità d’informazione integrata derivante dalla minima partizione di un sistema, t il tempo trascorso nel riferimento del sistema stazionario e $\sqrt{1 - (V/c)^2}$ la formula della dilatazione temporale derivante dalla relatività ristretta. Quanto più la

velocità di spostamento di un sistema cosciente è elevata, tanto più bassa sarà la quantità d'informazione integrata misurata nell'unità di tempo. In altre parole la quantità di Φ_{UT} è indirettamente proporzionale alla velocità di spostamento di un sistema cosciente. Tali effetti esistono anche a velocità più ordinarie, ma affinché siano visibili, è necessario interfacciarsi con velocità prossime a quelle della luce.

Essendo, attualmente, impossibile muoversi a velocità prossime a quelle della luce, possiamo considerare fenomeni naturali in cui ciò accade e comprendere in che modo gli effetti della relatività sulla coscienza siano tangibili.

Partendo dal presupposto che l'universo è espansione e che quanto più consideriamo galassie lontane, tanto più queste si spostano a velocità elevate (addirittura superiori a quelle della luce) possiamo eseguire un calcolo matematico attraverso il quale comprendere qual è, rispetto alla Terra, il livello d'informazione integrata nell'unità di tempo (Φ_{UT}) che un'eventuale sistema cosciente, presente su un'altra galassia che si allontana dalla nostra, potrebbe integrare. In relazione alla velocità di allontanamento della galassia considerata, si può calcolare la quantità di Φ_{UT} . Essendo la velocità di allontanamento delle galassie calcolata attraverso il redshift (z), si può calcolare il Φ_{UT} con la seguente formula:

$$\Phi_{UT} = \phi^{MIP} \cdot (t \cdot \sqrt{1 - z^2})$$

Si apre, dunque, uno scenario inaspettato che mette in luce una coscienza relativistica, il cui valore non è stabile e assoluto; ma si modifica, invece, in relazione all'interazione della coscienza con lo spazio-tempo.

Bibliografia

Joshua Kincaid, K. M. (2016). Measurement-induced decoherence and information in double-slit interference. *NIST Author Manuscripts* , 522-530

Mario, F. (2005). *Le attuali frontiere della psicologia clinica* . Centro Scientifico Editore.

C.Koch, M. M. (2016). Neural correlates of consciousness progress and problems. *Nature reviews. Neuroscience* , 17.

Owen A., C. M. (2006, September). Detecting awareness in the vegetative state. *Science* .

Capra, F. (1982). *Il Tao della fisica*. Adelphi.

G.Rees, G.Kreiman, & C.Koch. (2002, Aprile). Neural correlates of consciousness in humans. *Nature reviews. Neuroscience*.

G.Tononi, M. (2013). Nulla di più grande. Dalla veglia al sonno, dal coma al sogno. Il segreto della coscienza e la sua misura. In M. G.Tononi, *Nulla di più grande. Dalla veglia al sonno, dal coma al sogno. Il segreto della coscienza e la sua misura* (p. 80-81). Milano: Baldini&Castoldi.

Galilei, G. (1632). *Dialoghi sopra i due massimi sistemi del mondo*. Toscana.

Giulio Tononi, M. B. (2016, Maggio 26). Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate. *Nature review. Neuroscience* . , 450-461.

Herculano-Houzel, S. (2012). The remarkable, yet not extraordinary, human brain as a scaled-up primate and brain and its associated cost. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* , 109.

Lemon, R. N. (2012). Life without a cerebellum. *Brain* .

Mario, F. (2005). *Le attuali frontiere della psicologia clinica* . Centro Scientifico Editore.

Masafumi Oizumi, L. A. (2014). From the Phenomenology to the Mechanisms of Consciousness: Integration Information Theori 3.0. *PLoS Comput Biol* .

Matt J. Jarvis, S. R. (2001). On the redshift cut-off for steep-spectrum radio sources. *Nature* , 907–917.

Nir, Y. &. (2010). Dreaming and brain: from phenomenology to neurophysiology. *Trends Cogn. Sci* , 88-100.

Siclari, F. L. (2014). The neural correlates of consciousness in sleep: a no task, within-state paradigm. *Preprint at* .

Styler, D. F. (2012). *Capire davvero la relatività. Alla scoperta della teoria di Eistein*. Bologna: Zanichelli.

Tononi, G. (2003). *Galileo e il fotodiodo. Cervello, complessità e coscienza*. Roma: Editori Latenza.

Tononi, G. (2014). *PHI. Un viaggio dal cervello all'anima*. Torino: Codice Edizioni.

Matt J. Jarvis, S. R. (2001). On the redshift cut-off for steep-spectrum radio sources. *Nature* , 907–917.