

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA**

TEORIA DELL'INFORMAZIONE INTEGRATA, IIT

Relatore: Prof. Augusto Ferrante

Laureanda: Maria Chiara Bovo

Matricola: 2008860

Anno accademico 2022/2023

Data di Laurea 27/09/2023

Indice

1	Introduzione	3
2	Caratterizzare qualitativamente e quantitativamente la coscienza	4
2.1	Determinare la quantità di coscienza di un sistema	4
2.2	Capacità informativa	4
2.3	Capacità integrativa	5
2.4	Spazio e tempo in cui si sviluppa la coscienza	5
2.5	Un sistema in grado di integrare informazioni	6
2.6	Scala spaziale-temporale	6
2.7	Qualità della coscienza	7
2.8	Interazioni all'interno di un complesso	8
3	Fattori neuroanatomici	10
3.1	Importanza della specializzazione ed integrazione funzionale	10
3.2	Cervelletto	12
3.3	Formazione reticolare	12
3.4	Afferenze sensoriali del sistema talamocorticale	13
3.5	Efferenze motorie del sistema talamocorticale: i motoneuroni	14
3.6	Circuiti sottocorticali: i gangli della base	15
3.7	Circuiti isolati e corteccia cerebrale	16
3.8	Esperienza cosciente e divisione degli emisferi cerebrali	17
4	Fattori neurofisiologici	18
4.1	Plasticità sinaptica	19
4.2	Il sonno: uno stato alterato di coscienza	20
4.3	Sonno e consolidamento delle sinapsi	23
4.4	Ipnosi	23
5	Confutazione della teoria IIT	24
5.1	Sistemi causali e misurazione del grado di coscienza	25
5.2	Le esperienze in prima persona possono fungere da base empirica per l'IIT?	26
5.3	Esperimenti in grado di misurare il grado di coscienza	26
6	Conclusione	27
7	Bibliografia	29

1 Introduzione

Ogni sera, quando cadiamo addormentati in un sogno senza sogni, la coscienza svanisce e con lei il nostro universo privato: persone, oggetti e colori ma anche suoni, piaceri, dolori, pensieri e sentimenti. Persino il nostro io si dissolve, fino a quando ci svegliamo, o sogniamo.[1]

Tra i misteri ai quali l'essere umano ancora non ha dato risposta vi è quello dell'esperienza cosciente. Uno degli studi più noti a riguardo è la Teoria dell'Informazione Integrata (*Integrated Information Theory*, IIT), sviluppata dal neuroscienziato Giulio Tononi [2]. Tale teoria si basa sullo studio dell'esperienza, ovvero l'unico aspetto della realtà nel quale si sperimenta il fenomeno della coscienza, e deriva poi le proprietà di informazione ed integrazione dell'esperienza cosciente. L'IIT non trova il proprio fondamento nel mero studio del substrato cerebrale, ma nel modo in cui il substrato cerebrale organizza ed elabora le informazioni; la coscienza è dunque generata mediante l'integrazione di un'immensa quantità di informazioni. A partire dallo studio delle modalità di interazione degli elementi di un sistema risulta dunque possibile quantificare il grado di coscienza di tale sistema; in particolare, se le parti di un sistema interagiscono in un certo modo esso è cosciente, altrimenti lo è poco o addirittura non lo è.

In primo luogo, lo studio dell'esperienza cosciente si pone come obiettivo quello di studiare le condizioni che influenzano il grado di coscienza di un sistema, per poi rispondere a domande quali: perché la coscienza si sviluppa solo nel sistema talamocorticale, e non in altre parti come il cervelletto? Perché si è coscienti durante la veglia e non durante il sonno?

In secondo luogo, tenta di studiare le condizioni che determinano il tipo di coscienza di un sistema, e quindi di rispondere alla domanda del perché e in che modo specifiche zone del cervello forniscono qualità specifiche alla nostra esperienza cosciente.

Questa tesi si articola in quattro capitoli, in particolare, i primi tre capitoli presentano le basi dell'IIT e le sue implicazioni anatomiche e fisiologiche, mentre, il quarto capitolo riporta una confutazione della teoria proposta da Tononi.

Nel primo capitolo, l'elaborato introduce le proprietà chiave che caratterizzano l'esperienza cosciente. A partire dallo studio dell'esperienza, vengono poi definiti quali sono i sistemi in grado di generare coscienza e come possono fare ciò. Il secondo capitolo crea un ponte tra lo studio dei sistemi in grado di generare coscienza e lo studio della coscienza da un punto di vista neuroanatomico. In particolare, sono presenti numerose simulazioni a computer che descrivono come aree cerebrali diverse partecipano alla formazione dell'esperienza cosciente. Nel terzo capitolo si affronta un aspetto molto importante della coscienza: la sua dinamicità. L'evolvere della coscienza viene messo in relazione al substrato cerebrale ed è presente una sezione di approfondimento riguardo la plasticità sinaptica. In seguito, è presentato uno studio degli stati alterati di coscienza, come il sonno e l'ipnosi.

Tale teoria riscontra però dei limiti dal punto di vista della sua validità scientifica. L'IIT rientra tra le teorie che basano il loro studio dell'esperienza cosciente su come le parti di un sistema interagiscono. In termini di reti neurali, quindi, secondo tali teorie, i sistemi *feedforward* non sono mai coscienti mentre i sistemi di *feedback* sempre. Nell'ultima parte del manoscritto è pre-

sente un'argomentazione che, utilizzando le reti neurali, dimostra come possano esistere sistemi coscienti empiricamente identici a sistemi incoscienti. Tale argomentazione è dunque in grado di mettere in discussione la validità dell'IIT e mantenere tutt'ora aperto il dibattito riguardo lo studio dell'esperienza cosciente.

2 Caratterizzare qualitativamente e quantitativamente la coscienza

2.1 Determinare la quantità di coscienza di un sistema

La coscienza non è un qualcosa di statico: basti pensare come al risveglio si è pienamente coscienti mentre durante il sonno ciò non avviene, oppure come essa può variare in seguito all'iniezione di un farmaco anestetico o ad un trauma cranico. Essa è quindi dotata di un substrato fisico, una materia cerebrale che deve funzionare correttamente affinché l'uomo possa avere un'esperienza cosciente completa.

Per spiegare questo fenomeno Tononi adotta un approccio che integra medicina, neuroscienza ed ingegneria, partendo da uno studio di come un qualsiasi sistema fisico percepisce ed elabora le informazioni, per poi declinare tali osservazioni in campo neuroanatomico e neurofisiologico.

In primo luogo, per caratterizzare quantitativamente la coscienza, è necessario definire le tre proprietà chiave dell'esperienza cosciente: la capacità informativa, la capacità di integrazione e la sua relazione con spazio e tempo.

2.2 Capacità informativa

L'informazione contenuta nella coscienza è specifica, poiché uno specifico stato di coscienza è diverso da tutti gli altri. Se ad esempio il campo olfattivo di un individuo è concentrato sull'annusare la polvere del caffè, l'esperienza cosciente di tale individuo consiste del particolare odore del caffè e non di una qualsiasi altra pietanza.

Tononi spiega tale caratteristica dell'esperienza cosciente tramite l'esempio del fotodiodo. Si tratta di un sensore ottico in grado di rilevare la luce e reagire ad essa con uno stimolo elettrico. Esso presenta due stati possibili: acceso o spento; quindi, posizionando il fotodiodo in una stanza priva di luce esso indicherà 0, invece posizionandolo in una stanza illuminata indicherà 1. Allo stesso modo un qualsiasi individuo munito di una buona vista è in grado di affermare se vi è luce oppure no.

Che differenza vi è quindi tra l'affermazione dell'individuo e lo stato del fotodiodo?

Ma per il fotodiodo, 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 fotodiodo buio non era "buio", ma semplicemente uno

tra due. Il suo intero universo si riduceva a “questo sì”, “questo no”. Forse la differenza essenziale tra lui e il fotodiodo era l’informazione.[1]

Ciò che differisce è il numero di esperienze escludibili, infatti il fotodiodo esclude uno stato tra i due possibili, l’individuo invece ne esclude un enorme numero. Se, inoltre, si cambiasse il colore della luce, lo strumento continuerebbe a segnare 0 o 1, l’individuo invece noterebbe immediatamente il cambiamento. Quindi grazie al repertorio di alternative, costituito dagli innumerevoli stati escludibili, si può quantificare la coscienza.

2.3 Capacità integrativa

Questa proprietà della coscienza viene spiegata da Tononi attraverso il seguente esempio: una fotocamera digitale contiene un sensore con un chip costituito da una raccolta di un milione di fotodiodi. Ponendo che ogni fotodiodo sia binario, si possono distinguere $2^{1000000}$ stati possibili, un enorme numero di alternative.

A questo punto ci si potrebbe chiedere dove risiede la differenza tra un individuo e la fotocamera.

Prendi una frase lunga una dozzina di parole, e poi dodici uomini, e dì a ciascuno una parola sola: disponi gli uomini in fila o a casaccio, lasciando che ciascuno pensi alla propria parola con la massima concentrazione: da nessuna parte ci sarà una coscienza della frase intera.[1]

Il chip può assumere un immenso numero di stati, ma può anche essere visto come un insieme di un milione di fotodiodi ognuno assumente due stati possibili. Non essendovi infatti alcuna interazione o dipendenza tra i singoli fotodiodi, la differenza tra il chip ed un individuo risiede nella capacità di integrare le informazioni ricevute. La coscienza si basa proprio sull’integrazione delle informazioni, ovvero sulle interazioni che avvengono nei circuiti neurali. Nel caso in cui queste interazioni non avvengono più (come può accadere in seguito ad un grave trauma cranico) vi è un’evidente perdita di coscienza.

L’integrazione delle informazioni è parte della quotidianità di ogni individuo; ad esempio quando si vede un’immagine, essa viene percepita nel suo complesso l’esperienza del colore non può essere vissuta separatamente da quella della forma.

2.4 Spazio e tempo in cui si sviluppa la coscienza

L’esperienza cosciente ha luogo in una specifica scala spazio-temporale, ad una velocità caratteristica che non può aumentare o diminuire. Studi [3] dimostrano che un’esperienza sensoriale impiega circa 100-200 millisecondi a formarsi completamente: prima ci si accorge di un cambiamento, poi si distingue se implica vista, udito o olfatto, poi si percepiscono dimensioni, colori e forme per poi giungere alla creazione di un’immagine unitaria. Si noti che l’elaborazione di un pensiero cosciente può richiedere maggior tempo, ma una singola esperienza cosciente ha una durata massima di 2-3 secondi.

2.5 Un sistema in grado di integrare informazioni

Prendiamo in considerazione un sistema neurale disconnesso dal mondo esterno: ciascun elemento di tale sistema è costituito da interconnessioni neuronali che condividono ingressi e uscite e assume diversi stati di attività.

Il nostro sistema è costituito da sottoinsiemi, chiamati secondo la teoria IIT *complessi*, entità in grado di integrare informazioni. Nel momento in cui un complesso entra in un diverso stato, assume un certo valore di Φ , corrispondente alla quantità di informazioni da lui integrate. Φ è quindi una misura applicabile ai sistemi fisici e il suo valore, che si esprime in bit, indica quante informazioni un sistema è in grado di integrare. Ad esempio, si può calcolare tale valore stimolando una certa quantità di cellule nervose e verificando la vastità del repertorio delle risposte che la stimolazione induce.

Dopo aver definito Φ si è ora in grado di dare una definizione più rigorosa di complesso: si tratta di un sottoinsieme avente un valore positivo di Φ e che non è incluso in un sottoinsieme avente Φ maggiore [2]. Il complesso che presenta il valore di Φ più alto è chiamato *complesso principale*.

Quindi i complessi sono il luogo in cui vengono integrate le informazioni e possono definirsi come “soggetti” dell’esperienza, da cui deriva il carattere soggettivo della coscienza intesa come integrazione delle informazioni.

I complessi presentano due caratteristiche principali: la prima è la loro capacità di interagire con elementi esterni, scambiando informazioni con essi, la seconda è la sovrapponibilità. I complessi, infatti, possono contenere elementi appartenenti a più complessi e sovrapporsi.

Allo scopo di quantificare la coscienza è quindi necessario, in primo luogo, analizzare il sistema costituito da sottoinsiemi identificandone i complessi che gli appartengono ed in seguito calcolare il valore di Φ di ciascun complesso, ovvero quante informazioni il complesso è in grado di integrare. A questo punto è quindi possibile affermare che solo gli elementi del complesso contribuiscono alla creazione di un’esperienza cosciente.

2.6 Scala spaziale-temporale

I valori di Φ possono variare entro una scala spaziale ed una temporale, in particolare i complessi che presentano un valore massimo di Φ si trovano in sottoinsiemi a scale temporali e spaziali critiche.

Da un punto di vista spaziale, si può affermare che il fenomeno di attivazione sincrona di gruppi di neuroni, chiamati microcolonne corticali, produce valori di Φ più elevati dell’attivazione asincrona di un gran numero di singoli neuroni. Come si nota nella Figura 1, le microcolonne sono strutture costituite da neuroni impilati gli uni sugli altri che si estendono lungo i vari strati della corteccia cerebrale; i neuroni sono così fortemente interconnessi che condividono input e output. All’interno della microcolonna i neuroni costituiscono dei circuiti locali e la loro organizzazione è diversa in base alla regione della corteccia a cui appartengono.

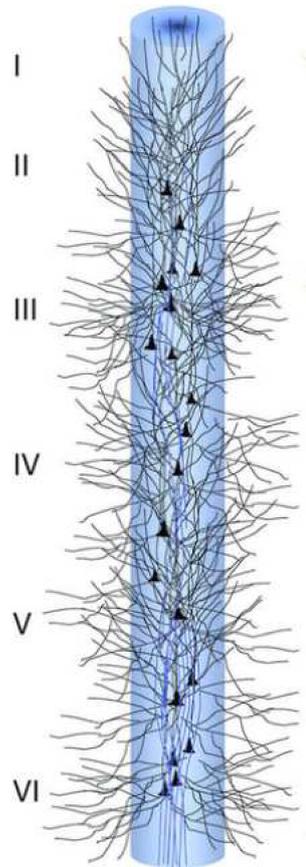


Figura 1: Microcolonna corticale

Nella Figura 1 è possibile identificare la struttura di una microcolonna corticale, costituita da strette catene di neuroni che si estendono lungo i vari strati della corteccia cerebrale, precisamente dal primo al sesto.

Da un punto di vista temporale, poiché si è calcolato che una percezione risulta stabile e specifica dopo circa 100 millisecondi e che, in seguito ad uno stimolo, i neuroni localizzati in diverse aree cerebrali impiegano circa 80 millisecondi ad interagire e attivarsi, è possibile concludere che il valore massimo di Φ è registrabile in un intervallo temporale che va da decine a centinaia di millisecondi.

2.7 Qualità della coscienza

Come la quantità di coscienza, anche la qualità dipende dal tessuto cerebrale, in particolare dalla sua organizzazione. Acquisire una capacità, infatti, significa cambiare le interazioni neurali, allargare l'insieme delle sensazioni: il nostro cervello si modella attraverso l'esperienza. La maggior parte degli individui hanno modi di pensare diversi a 20 e 40 anni, e ciò è dovuto alla neuroplasticità, che comporta cambiamenti nella struttura e nell'organizzazione cerebrale in risposta all'ambiente circostante.

Ad esempio, un sommelier, esperto nella degustazione di vini, impara a distinguere un ampio numero di vini allargando e specializzando ogni volta la gamma di percezioni scaturite dall'assaggio; ciò è dovuto al fatto che ogni esperienza comporta una riorganizzazione dei modelli di

connessione neurale.

Il fatto che alcune aree corticali contribuiscano ad una specifica esperienza cosciente, ad esempio la percezione dei colori, la percezione dello spazio e del suono, ha a che fare con il modo in cui le informazioni sono scambiate all'interno di ciascuna area, quindi con il particolare tipo di circuito neurale. In particolare, secondo la teoria IIT, affinché ci sia un'esperienza cosciente vi deve essere integrazione di informazioni all'interno di un complesso. Le particolari interazioni all'interno di un complesso e tra ogni complesso e il resto del complesso principale determinano la qualità dell'esperienza cosciente.

Le interazioni tra gli elementi di un complesso hanno luogo in un determinato spazio astratto chiamato *spazio dei qualia* le cui dimensioni sono date dagli elementi del complesso. Le caratteristiche di tale spazio astratto sono determinate dalle interazioni di tipo informativo tra gli elementi.

Le relazioni esistenti al di fuori del complesso principale, come gli input dalla periferia sensoriale, non danno un contributo diretto allo sviluppo della coscienza. Ad esempio un danneggiamento alla retina in età adulta può portare a cecità, ma lascia invariata la capacità di immaginare a colori; invece, danni alla corteccia cerebrale, impediscono completamente di percepire i colori.

2.8 Interazioni all'interno di un complesso

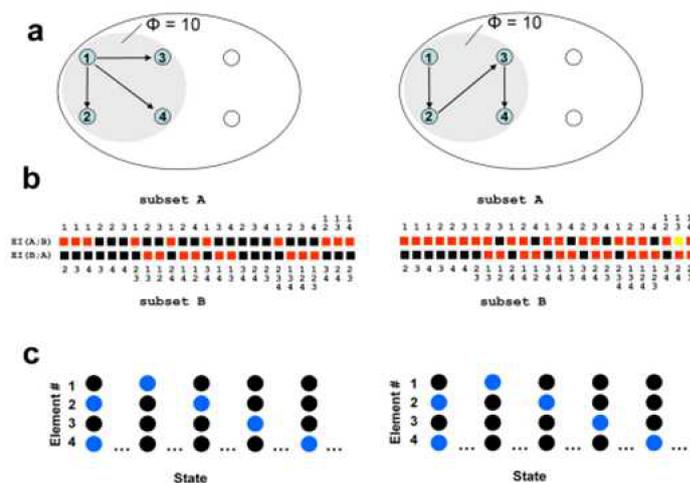


Figura 2: Modello delle interazioni che avvengono tra gli elementi di un complesso

La Figura 2a mostra due diagrammi di interazioni tra gli elementi di un complesso. In particolare nel primo sistema il primo elemento è collegato in maniera eguale ai 3 elementi ed invia loro stimoli, tale sistema costituisce un complesso con un valore di Φ pari a 10 bit. Il secondo sistema presenta, invece, interazioni diverse tra le parti che lo compongono: il primo elemento è connesso al secondo che a sua volta è connesso al terzo che a sua volta è connesso al quarto, tuttavia anche questo complesso presenta un valore di Φ di 10 bit.

Nella Figura 2b notiamo la matrice delle informazioni in cui sono evidenziate in rosso le transizioni possibili, in nero quelle non possibili e in giallo quelle più intense. infatti nel subset A è possibile il passaggio da 1 a 2, segnato attraverso un pallino rosso, ma non da 2 a 1 e per questo è presente il pallino nero.

Quindi nonostante nei due sistemi Φ e anche le dimensioni siano uguali, la matrice informativa è diversa poiché sono diverse le relazioni informative nei due sistemi.

Per semplicità si riporta qui sotto in forma matriciale:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Nel caso del percorso diretto, ovvero secondo l'ordine indicato dalle frecce, ogni riga indica l'elemento da cui si passa la colonna l'elemento a cui si arriva; dove è presente il numero 0, significa che non vi è nessuna strada, e che quindi quel percorso non è percorribile, dove è presente un numero maggiore uguale ad 1 il percorso è valido. Ad esempio, la matrice del primo sottoinsieme presenta il numero 1 nella seconda colonna della prima riga, questo perché la strada che porta dall'elemento 1 all'elemento 2 è percorribile, il percorso da 2 a 3 invece non è possibile, infatti la terza colonna della seconda riga presenta uno 0.

Per il percorso inverso l'ordine di lettura è scambiato, la colonna indica il punto di partenza mentre la riga il punto di arrivo. Inoltre, è possibile scegliere insiemi di partenza o arrivo che contengono più di un elemento ad esempio partendo da 1 è possibile arrivare a 2,3; per calcolare il risultato è necessario scomporre e sommare, quindi: partendo da 1 e arrivando a 2 si ottiene 1, partendo 1 e arrivando a 3, si ottiene 1, in totale il percorso da 1 a 2,3 restituisce 2 ovvero vi è almeno una via percorribile.

Lo stato di un complesso nel tempo è rappresentato da un diagramma di stato (Figura 3c), dove le colonne rappresentano l'attività degli elementi del complesso: il pallino blu indica che tale elemento è attivo, nero inattivo. Si noti che nonostante i diagrammi di stato e i valori di Φ , per i due sistemi siano identici, il loro significato non lo è, poiché varia la matrice informativa. Le colonne 2,3,4 indicano stati in cui un solo elemento per volta è attivo.

Quindi dal diagramma di stato possiamo ottenere una rappresentazione spaziale di un singolo stato cosciente e di una successione di stati coscienti; infatti, il diagramma mostra che un singolo stato di coscienza, tenendo in considerazione lo stato di attività di tutti gli elementi, è ben rappresentato da un punto all'interno dello *spazio dei qualia*, mentre una successione di stati di coscienza è rappresentato da una traiettoria.

Quindi la matrice informativa permette di esemplificare le relazioni tra gli elementi di un complesso, e quindi di caratterizzare qualitativamente lo stato di coscienza. Il diagramma di stato invece mostra i valori delle variabili che mediano le informazioni tra gli elementi, determinando lo stato di coscienza in un elemento in ogni istante, sia quelli attivi che inattivi.

3 Fattori neuroanatomici

Secondo studi neuroanatomici il substrato della coscienza è costituito da una rete talamocorticale distribuita; non è dunque correlato ad una unica area corticale in cui si riuniscano aree specializzate. Tutto ciò è dovuto al fatto che il flusso cosciente si sviluppa a partire dalla cooperazione di numerose regioni cerebrali.

Inoltre, studi elettrofisiologici indicano che l'attività neurale dell'esperienza cosciente è collocata in gran parte nella corteccia cerebrale. La corteccia cerebrale può essere suddivisa in aree che hanno una diversa composizione e funzione. Le aree sensoriali sono deputate alla recezione degli stimoli, le aree motorie all'esecuzione del movimento e le aree associative sono addette a connettere diverse porzioni della corteccia. Essa infatti riveste un importante ruolo nel controllo di attività quali memoria, apprendimento e pensiero, e nel controllo delle funzioni sensoriali e movimenti volontari. È quindi il centro di elaborazione ed integrazione delle informazioni nervose. In generale, la corteccia cerebrale presenta una prima suddivisione tra vari sistemi, specializzati in diverse funzioni, come vista e udito. All'interno di ogni sistema c'è un'ulteriore suddivisione in aree specializzate: ad esempio il sistema visivo si distingue per forma e colore. Infine in ogni area ci sono gruppi di neuroni specializzati.

Il sistema talamocorticale garantisce specializzazione ed integrazione funzionale grazie al fatto che questi stessi gruppi di neuroni sono collegati da un'estesa rete di connessioni sia all'interno dell'area a cui appartengono sia tra aree diverse.

3.1 Importanza della specializzazione ed integrazione funzionale

Tramite simulazioni a computer, viene data un'esemplificazione di ciò che è stato precedentemente affermato, ovvero che i sistemi in grado di integrare informazioni sono proprio quelli che presentano un'ampia rete di connessioni neurali specializzate, come ad esempio il sistema talamocorticale.

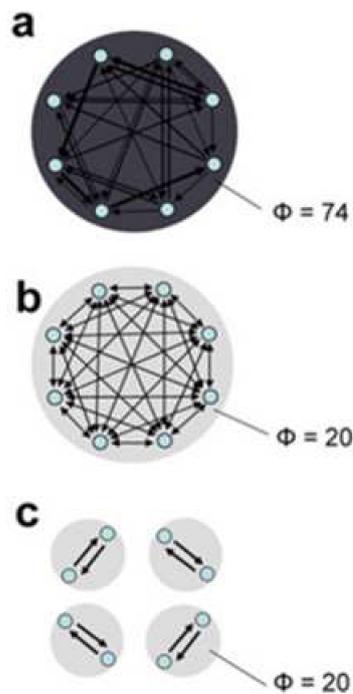


Figura 3: Modello del processo di integrazione delle informazioni nel sistema talamocorticale.
 a. Sistema che presenta sia integrazione delle informazioni che specializzazione delle informazioni.
 b. Sistema che presenta minor specializzazione funzionale, poiché le interazioni tra gli elementi sono omogenee.
 c. Sistema che presenta minor integrazione funzionale, poiché è diviso in quattro moduli indipendenti.

La Figura 3a riporta un modello computerizzato di un complesso che, avendo modelli di connessione diversi, presenta specializzazione funzionale ed integrazione funzionale. Infatti si può notare che ciascun elemento è accessibile da tutti gli altri. Questo sistema grazie a queste due caratteristiche presenta un valore di Φ molto alto di 74 bit.

Nelle figure 3b e 3c invece sono rappresentati due sistemi i cui valore di Φ di 20 bit coincide ed è minore rispetto al valore del sistema della figura a.

Ciò è dovuto al fatto che nella Figura b non è presente differenziazione funzionale, infatti presenta connessioni omogenee. Nella figura c non vi è integrazione funzionale, infatti, il sistema è costituito da piccoli moduli sconnessi gli uni dagli altri, ovvero da sistemi isolati che non interagendo tra loro scambiano un piccolo numero di informazioni. Questi due sistemi non presentando le caratteristiche necessarie a massimizzare il valore di Φ , ne contengono uno minore. Esistono poi delle aree cerebrali necessarie allo sviluppo dell'esperienza cosciente, in grado di interagire con il complesso principale ma che non facendone strettamente parte non contribuiscono direttamente alla formazione dell'esperienza cosciente. Esse possono essere vie afferenti o efferenti e sotto circuiti isolati. Tra queste strutture troviamo: il cervelletto, le formazioni reticolari, i sistemi sensoriali, i motoneuroni, i gangli della base e circuiti isolati della corteccia cerebrale.

3.2 Cervelletto

Il cervelletto costituisce circa il 10% della massa cerebrale e l'50% dei neuroni cerebrali; inoltre, contiene numerose sinapsi, riceve input dalla periferia sensoriale e controlla numerosi output. Tutto ciò potrebbe far credere che l'esperienza cosciente abbia origine da questa zona, più ricca di neuroni e quindi con una rete neurale più fitta, tuttavia recenti studi hanno mostrato che non è così. Infatti il cervelletto pur avendo un gran numero di neuroni non presenta un tipo di struttura cerebrale adatta allo sviluppo dell'esperienza cosciente. Un individuo privo di cervelletto presenta numerosi problemi di coordinazione, ma ha un'esperienza cosciente valida ed intensa come quella di un individuo sano.

Il motivo per cui il cervelletto non contribuisce in maniera significativa alla formazione dell'esperienza cosciente, risiede nel fatto che presenta connessioni cerebellari diverse rispetto al sistema talamocorticale, in cui singole aree della corteccia cerebellare sono attivate in maniera indipendente, presentando piccoli complessi con bassi valori di Φ .

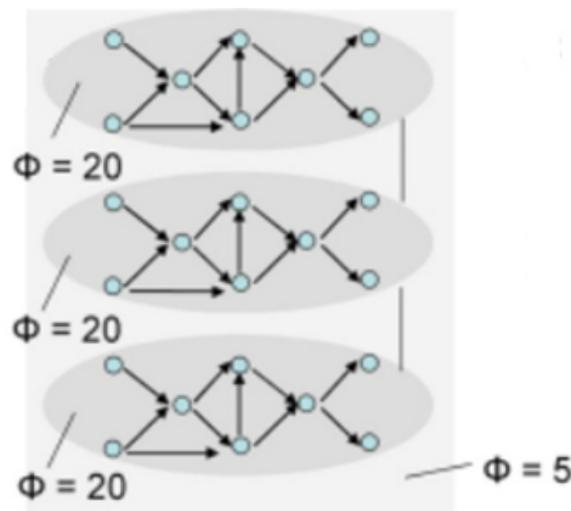


Figura 4: Modello computerizzato dell'organizzazione del cervelletto. Sono presenti tre moduli di otto elementi, le interazioni tra i tre sottoinsiemi sono minime.

La Figura 4 mostra una simulazione a computer di come il cervelletto è organizzato. Questo particolare sistema presenta tre complessi di otto elementi ciascuno, e ogni elemento è connesso ad un altro o a più di uno. Quindi, le connessioni all'interno di uno stesso complesso sono diverse e numerose, mentre non si può affermare lo stesso per le interazioni che vi sono tra un modulo e l'altro, poiché sono minime e proprio per tal motivo il sistema presenta un valore di Φ di appena 5 bit.

3.3 Formazione reticolare

La formazione reticolare è una struttura costituita da un insieme di neuroni, localizzata a livello del tronco encefalico, che ha il compito di proiettare in maniera diffusa alla corteccia attivando i principali circuiti dell'informazione, costituendo quindi il sistema di attivazione e spegnimento della coscienza.

Tuttavia, questa porzione cerebrale, pur essendo essenziale per il funzionamento del sistema talamocorticale, non contribuisce direttamente alla formazione dell'esperienza cosciente, poiché esclusa dal punto di vista informativo.

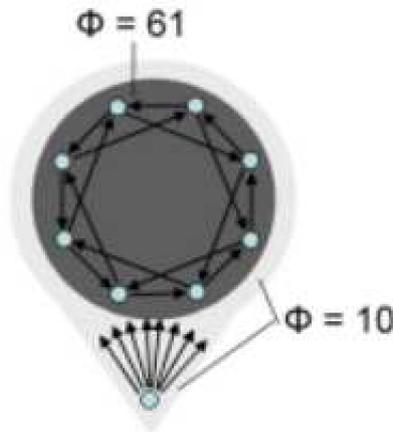


Figura 5: Modello computerizzato dell'organizzazione della formazione reticolare. Un unico elemento proietta numerosi input al complesso principale del sistema talamocorticale.

La Figura 5 fornisce una buona simulazione del funzionamento della formazione reticolare. Il complesso che presenta un alto valore di Φ riceve input dalla formazione reticolare, la quale però, rimane esclusa da tale complesso da un punto di vista informativo. Essa appartiene ad un complesso maggiore che presenta un basso valore di Φ .

3.4 Afferenze sensoriali del sistema talamocorticale

I sistemi sensoriali sono strutture addette ad informare l'organismo su ciò che accade esternamente ed internamente. Le informazioni acquisite sull'ambiente circostante sono inviate tramite recettori sensoriali all'encefalo dove si produce una sensazione.

Vi sono numerosi recettori sensoriali in grado di rispondere a forme di energia diverse. Ad esempio i fotorecettori retinici sono neuroni specializzati in grado di catturare quanti di luce che arrivano sul fondo dell'occhio e trasformarli in segnali bioelettrici che dal nervo ottico arrivano all'encefalo.

In particolare, la visione dei colori e la visione notturna sono permesse da due tipi diversi di fotorecettori: coni e bastoncelli, i primi sono responsabili della visione dei colori, i secondi della percezione del contrasto. Un danno alla retina e quindi ai recettori retinici, compromette la vista e la capacità di visualizzare immagini e quindi di avere un'esperienza cosciente completa del mondo che ci circonda. Tuttavia, non impedirebbe di crearci un'immagine dell'ambiente esterno e quindi di creare un'esperienza cosciente più limitata ma valida.

Come si nota nella Figura 6, aggiungendo o togliendo percorsi isolati in ingresso, come possono essere i recettori sensoriali, non viene alterato il complesso principale ovvero il luogo dove vengono integrate le informazioni. Questo è dovuto al fatto che, questi percorsi in ingresso appartengono ad un complesso più grande che ha un valore di Φ minore. Gli input vengono

accolti e filtrati da un elemento del complesso principale e le informazioni contenute sono poi integrate all'interno del complesso. Per questo motivo input intensi non alterano in maniera significativa l'esperienza cosciente.

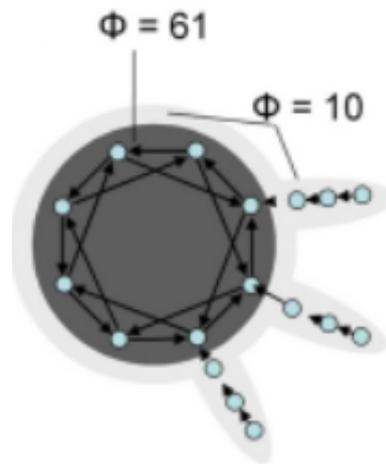


Figura 6: Modello dell'organizzazione dei recettori sensoriali. Sono presenti tre vie afferenti connesse che inviano informazioni a tre porte di ingresso del complesso principale.

Nella Figura 6 è presente un sistema principale connesso a tre sistemi isolati in ingresso, ciascun sistema si interfaccia con un elemento del complesso principale, il quale riceve, filtra ed invia le informazioni.

3.5 Efferenze motorie del sistema talamocorticale: i motoneuroni

I motoneuroni, sono vie nervose che trasportano informazioni dal sistema nervoso centrale e dal midollo spinale verso la periferia, costituita dalle fibre muscolari. Essi permettono il movimento dei muscoli volontari e involontari e la risposta a stimoli sensoriali. Tuttavia anche i circuiti neurali in uscita, così come quelli in entrata, non partecipano in maniera specifica all'esperienza cosciente. Un esempio è la sindrome di *locked-in*, in cui vi è una paralisi dei muscoli volontari ad eccezione di quelli dell'occhio. Il paziente è vigile e consapevole, in grado di percepire il proprio corpo, ma non di muoverlo. Vi è coscienza del mondo esterno, tuttavia, risulta possibile comunicarla solo tramite il movimento oculare e di nessun altro muscolo volontario.

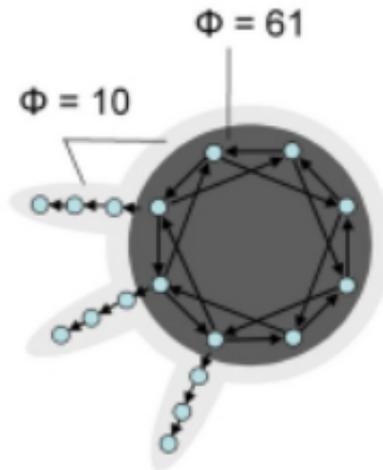


Figura 7: Modello dell'organizzazione delle vie efferenti. Sono presenti tre vie efferenti che ricevono informazioni da tre porte di uscita del sistema talamocorticale.

Anche in questo caso, come si può notare nella Figura 7, aggiungendo o togliendo circuiti isolati in uscita, che appartengono ad un circuito più grande con un valore di Φ minore, non viene alterato il complesso principale.

3.6 Circuiti sottocorticali: i gangli della base

I gangli della base sono gruppi di neuroni organizzati in circuiti paralleli e coinvolti in quattro circuiti sottocorticali: motorio, oculomotorio, limbico e cognitivo. Ogni circuito origina in una specifica zona del quinto strato della corteccia.

L'informazione, dai gangli viene trasmessa ai nuclei della base, dove viene integrata, il circuito poi prosegue nel talamo per poi tornare alla corteccia. Lo scopo dei gangli della base è modulare la trasmissione talamocorticale. Infatti le informazioni delle vie afferenti attraversano il talamo e grazie ai gangli sono filtrate con la conseguente attivazione dei soli meccanismi prescelti.

Tali strutture cerebrali, sebbene collegate al sistema talamocorticale, non alterano la composizione del complesso principale, ma costituiscono dei circuiti che interagiscono con esso e partecipano alla formazione dell'esperienza cosciente.

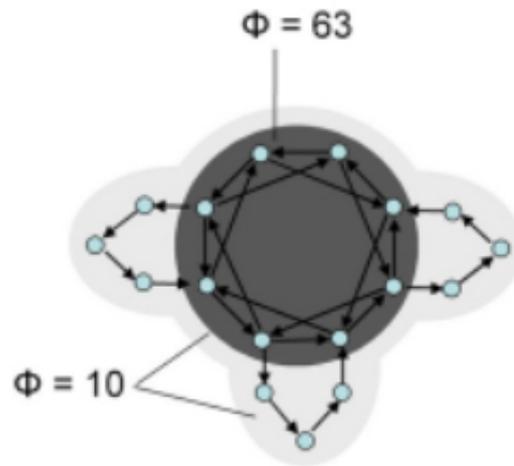


Figura 8: Modello dell'organizzazione dei sistemi isolati del sistema talamocorticale. Sono presenti tre sistemi isolati che inviano informazioni e ricevono informazioni dal complesso principale. Questo permette la creazione di nuove interazioni all'interno del complesso principale.

Nella Figura 8 si può nuovamente osservare come i circuiti esterni al sistema principale appartengano ad un complesso maggiore con un basso valore di Φ . Si noti che però, in questo caso, i circuiti esterni incrementano di due bit il valore di Φ del complesso principale, permettendo così nuove interazioni tra i suoi elementi.

Questi circuiti isolati, sono creati attraverso la ripetizione e automatizzazione di una nuova attività mentale o motoria, Nel momento in cui si esegue un compito per la prima volta, viene attivato il complesso principale, quando invece esso diventa una conoscenza acquisita e quindi viene svolto in modo automatico, sono attivati i circuiti isolati, come ad esempio, i gangli della base. Nel morbo di Parkinson si verifica un danneggiamento nella trasmissione dopaminergica dei nuclei della base. Per questo motivo, i pazienti necessitano di molta concentrazione nell'eseguire attività quotidiane apprese dall'infanzia, come il camminare e il deglutire correttamente.

3.7 Circuiti isolati e corteccia cerebrale

Circuiti isolati sono presenti anche all'interno del sistema talamocorticale stesso. Sebbene l'esperienza cosciente si sviluppi principalmente nel sistema talamocorticale ed in particolare nella corteccia cerebrale, vi sono delle zone isolate all'interno di tale area che, non sono parte del complesso principale, ma costituiscono dei nuclei isolati interagenti con esso.

Tali circuiti isolati permettono di eseguire tutti quei compiti, di cui l'individuo non è consapevole, necessari però alla creazione dell'esperienza cosciente. Ad esempio, ciò si verifica nel momento in cui si visualizza un'immagine ed essa appare automaticamente in diversi livelli: sfondo, primo piano, secondo piano. Oppure, nel momento in cui avviene una conversazione, l'attenzione è posta sul contenuto poiché l'analisi del linguaggio viene eseguita automaticamente da circuiti isolati.

Quindi, come per i circuiti isolati menzionati fino ad ora, anche quelli del sistema talamocorticale non contribuiscono direttamente all'esperienza cosciente, ma sono necessari per il

suo sviluppo ed apportano miglioramenti in termini quantitativi e qualitativi all'esperienza cosciente.

3.8 Esperienza cosciente e divisione degli emisferi cerebrali

Gran parte del cervello umano è costituito da due emisferi: destro e sinistro, ciascuno dotato di uno strato esterno chiamato corteccia cerebrale ed uno più interno chiamata zona sottocorticale uniti dal corpo calloso.

Il cervello presenta un'organizzazione controlaterale ovvero: l'emisfero destro controlla percezioni e movimenti della parte sinistra del corpo e l'emisfero sinistro controlla della parte destra. I due emisferi sono però diversi e altamente specializzati, in particolare, l'emisfero sinistro controlla il linguaggio, il ragionamento logico-matematico ed il pensiero analitico. L'emisfero destro l'orientamento spaziale, la creatività, l'espressione linguistica.

La sindrome callosale è la condizione in cui i due emisferi sono separati. Essa può essere conseguenza di un'operazione, ad esempio nel caso di pazienti con grave epilessia si ricorre a tale intervento con lo scopo di interrompere la propagazione di focolai epilettici in casi di epilessie farmaco-resistenti. Oppure nel caso di agenesia del corpo calloso, si verifica una mancanza di tale regione cerebrale fin dalla nascita. Sembra che tale condizione non comprometta il normale svolgimento di attività quotidiane ad eccezione di difficoltà nel linguaggio e ridotte abilità sociali.

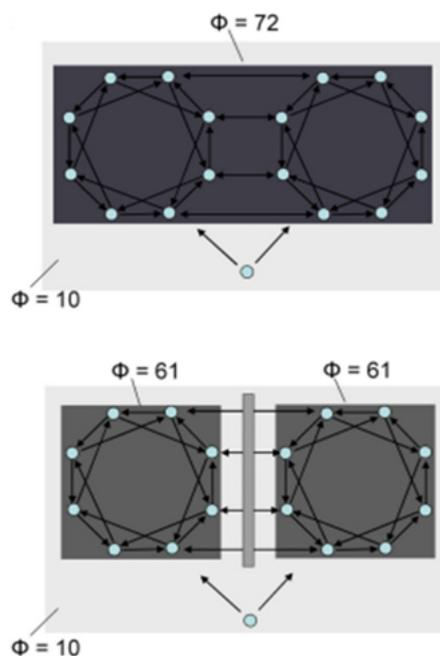


Figura 9: Esempificazione della separazione degli emisferi cerebrali.

Immagine superiore: Il complesso principale è costituito dai due emisferi uniti dal corpo callosale, sono presenti numerose interazioni tra i due emisferi. Un unico elemento proietta ad entrambi gli emisferi e rappresenta l'input dal sistema sottocorticale.

Immagine inferiore: Condizione di *split-brain*, sono presenti due emisferi separati che costituiscono due complessi separati. Un unico elemento proietta ad entrambi gli emisferi e crea delle interazioni tra essi.

La condizione di *split-brain* o cervello separato, in cui gli emisferi lavorano separatamente senza evidenti ripercussioni sull'esperienza cosciente, trova conferme nella teoria IIT. Nella Figura 9 è presente un complesso principale, diviso in due sottoinsiemi comunicanti costituito da otto elementi ciascuno, tale complesso presenta un valore di Φ piuttosto alto di 72 bits. Vi è poi esternamente un complesso sottocorticale con un valore di Φ di soli 10 bit che invia input al complesso principale. Nella parte superiore della Figura 9 viene rappresentata la condizione di *split-brain*, i due sottoinsiemi sono separati, costituendo due complessi principali diversi che però mantengono alto il loro valore di Φ a 61 bit, i due emisferi costituiscono comunque un'entità integrata che scambia poche informazioni tramite il complesso sottocorticale. Quindi in seguito alla separazione dei due emisferi anche la coscienza risulta divisa, ma la sua quantità risulta pressoché invariata in ciascun emisfero, questo è dovuto al fenomeno della ridondanza degli emisferi cerebrali. Ciascun emisfero presenta caratteristiche specifiche ed è addetto a controllare zone specifiche; ma ad esempio per attività come il linguaggio, controllato dall'emisfero sinistro sono presenti circuiti neuronali che lo controllano anche in quello destro. Tale ridondanza permette di mantenere elevata la capacità di ciascun emisfero di integrare informazioni, sebbene ci sia una significativa diminuzione dell'interazione tra i due.

4 Fattori neurofisiologici

La neurofisiologia è una branca della fisiologia che studia l'attività bioelettrica del sistema nervoso e, come si sviluppano e variano in dipendenza dell'ambiente circostante, le connessioni neurali. Esse infatti non sono statiche ma si modificano costantemente e possono ed essere più o meno efficaci influenzando sulla quantità e sulla qualità dell'esperienza cosciente.

Ad esempio, nel caso di patologie che portano al deficit di un senso, vi è una compensazione con un rinforzo nelle connessioni neurali delle aree che controllano gli altri sensi. Tale casistica viene esemplificata mediante una simulazione a computer riportata di seguito. Nella parte superiore della Figura 10 è presente un complesso costituito da tre sottoinsiemi interagenti tra loro. Possiamo identificare tali sottoinsiemi come i sistemi che regolano rispettivamente: vista, udito e funzioni cerebrali superiori come: linguaggio, ragionamento, pianificazione.

Si noti come il sottoinsieme addetto al controllo delle funzioni cerebrali superiori è connesso sia a quello addetto alla vista che a quello addetto all'udito, gli ultimi due invece non risultano connessi tra loro. I tre sottoinsiemi formano un unico grande complesso avente un valore di Φ di 61 bit.

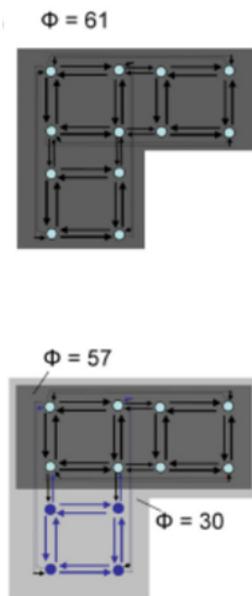


Figura 10: Esempificazione della disconnessione di una parte del complesso principale. Immagine superiore: è presente un unico grande complesso costituito da tre moduli di quattro elementi. Il primo modulo è collegato sia al secondo che al terzo, mentre il secondo ed il terzo non sono connessi tra loro. Immagine inferiore: disconnessione di un modulo dal modulo superiore. Ora il complesso principale è costituito solo dagli altri due moduli.

Successivamente, come mostrato nella parte inferiore della figura viene disconnesso il terzo sottoinsieme, quello addetto al regolamento delle funzioni uditive, esso risulta così escluso dal complesso principale, iniziando a far parte di un complesso maggiore con un valore di Φ uguale a 30 bit. Tale modifica porta ad una minima variazione del valore di Φ del complesso principale che passa da 61 a 57 bit. Ciò è dovuto al fatto che vi è una riorganizzazione neuronale che compensa il deficit e fa variare lo spazio delle interazioni tra gli elementi del complesso e i confini del complesso stesso.

4.1 Plasticità sinaptica

Il cervello umano risponde alle circostanze esterne ed in particolare all'esperienza soggettiva che è ciò che permette di plasmarlo. La realtà soggettiva dipende dal modo in cui nel tempo si creano e modificano i circuiti neurali. La capacità dei circuiti di modificarsi in base all'esperienza è detta plasticità. Nell'età dello sviluppo si assiste ad una selezione delle sinapsi neuronali tramite il meccanismo di competizione sinaptica. Ovvero vi è una concorrenza tra sinapsi per innervare una specifica zona, ad esempio se tra due sinapsi una sola è attiva, l'altra viene rimossa, oppure se una è più attiva dell'altra, essa si rafforza creando una nuova sinapsi. In seguito, durante l'età adulta alcuni circuiti rimangono stabili mentre altri conservano la loro capacità di modificarsi in seguito all'esperienza. Un esempio di plasticità sinaptica è costituito dal potenziamento a lungo termine che consiste in un rafforzamento delle connessioni sinaptiche che dura nel tempo.

Si è potuto verificare che, stimolando l'ippocampo con un treno di impulsi di frequenza di 100

Hz, quindi tramite una ripetizione periodica di un medesimo impulso, vi è per tutta la durata della stimolazione un aumento della frequenza di scarica e conseguentemente del potenziale postsinaptico eccitatorio. Questa modifica permane anche al termine della stimolazione. Nella sinapsi si verifica un cambiamento funzionale, che consiste in una via di trasmissione del segnale più veloce, e un cambiamento strutturale, data dal fatto che si instaurano nuove connessioni e nuova espressione genica.

Questa tipologia di plasticità sinaptica ha un ruolo rilevante in malattie come la Sclerosi Multipla Recidivante Remittente. Si tratta di una patologia autoimmune in cui il sistema immunitario aggredisce la struttura mielinica che ricopre le fibre nervose con il conseguente danneggiamento della trasmissione nervosa. In questa particolare forma di sclerosi multipla (ne esistono di molti tipi) si alternano periodi di remissione della malattia, a periodi di ricadute in cui si presentano nuove lesioni cerebrali. Tuttavia spesso la remissione non consiste nel ritorno al normale funzionamento delle aree colpite, ma piuttosto ad un parziale recupero tramite riemilizzazione.

Si è teorizzato che, il potenziamento a lungo termine, sia un fattore di incidenza rilevante nella fase di remissione in seguito ad una ricaduta. Infatti, la formazione di nuove connessioni permette di compensare la diminuzione di sinapsi neuronali causata dalla malattia. Per verificare tale ipotesi è stato fatto uno studio su un campione di 22 persone affette da SMRR calcolando LTP (*Long Term Potentiation*) indotto da PAS (*Paired Associative Stimulation*) durante la fase di ricaduta. La PAS è una tecnica di stimolazione cerebrale in cui vengono inviati numerosi stimoli che inducono modifiche nell'eccitazione neuronale e permettono di calcolare la plasticità sinaptica. È stato rilevato che, nel caso di un LTP nella norma, si verifica un completo recupero dei danni, mentre nel caso di un LTP ridotto non è così. Quindi il fenomeno di potenziamento a lungo termine permette di compensare i danni cerebrali nella SMRR e di predire la capacità di recupero di un individuo.

Ad oggi le terapie farmacologiche sono in grado di marginare gli effetti della malattia, ma presentano anche numerosi effetti collaterali, talvolta debilitanti, per questo sta prendendo piede l'utilizzo della TMS (*Transcranial magnetic stimulation*).

4.2 Il sonno: uno stato alterato di coscienza

Un importante parametro neurofisiologico per lo studio della coscienza è il sonno: uno stato alterato di coscienza. Al risveglio si ha l'impressione che sia noi che il mondo che ci circonda sia scomparso per un certo periodo di tempo, tutto ciò è un'importante prova della variabilità della coscienza di ciascun individuo. È importante sottolineare che il sonno prevede varie fasi e non tutte presentano lo stesso livello di coscienza. Ad esempio, se si sveglia una persona appena dopo la fase REM si potrà facilmente ottenere un racconto dettagliato del sogno in atto. Il sonno si distingue in due fasi: sonno REM, sonno NREM che si susseguono ad intervalli di 70-120 minuti.

Durante la fase REM si ha un completo distacco della realtà con elevata attività onirica solitamente molto accurata. Questa fase è caratterizzata da rapido movimento oculare, con l'alternanza di ipotonia e atonia muscolare. Inoltre, si verifica un'elevata attività cerebrale, l'EEG infatti

risulta simile a quello registrato durante la veglia, al risveglio da questa fase vi è un'elevata probabilità di ricordare il sogno.

Il 75-80% del sonno totale rientra nella fase NREM dove non sono presenti movimenti oculari, l'attività neuronale diminuisce, l'EEG registra una diminuzione della frequenza ed un aumento del voltaggio. Questa fase si può essere ulteriormente suddivisa in 4 stadi: nel primo stadio si ha il passaggio dallo stato di veglia al sonno, si registrano lenti movimenti oculari, l'attività cerebrale diminuisce e si registrano le onde Alpha di frequenza tra gli 8 e i 13 Hz. Nel secondo stadio si verifica un rilassamento muscolare con una diminuzione dello stato coscienza, in questa fase si è completamente addormentati. Le fasi 3 e 4 sono chiamate fasi ad onde lente, si registrano le onde Delta caratterizzate da una grande ampiezza e una frequenza di 0.1-3 Hz. In questo caso il sonno è profondo e solitamente al risveglio non si riferisce alcuna attività onirica, proprio in queste fasi sembra che il livello di coscienza si riduca drasticamente. Una tale riduzione della coscienza potrebbe dipendere dal grado di bistabilità dei circuiti talamocorticali [4]. Un sistema si definisce monostabile se presenta uno stato di equilibrio, un sistema è bistabile se possiede due stati di equilibrio ed evolve necessariamente verso uno di questi due stati. Negli stadi 3 e 4 del sonno NREM, si verifica un'oscillazione ad onde lente in cui i neuroni oscillano tra una fase in cui sono depolarizzati ed una in cui sono iperpolarizzati. Nella fase di depolarizzazione la differenza di concentrazione di ioni tra l'interno e l'esterno della membrana causa una diminuzione del potenziale di membrana, nella fase di iperpolarizzazione il potenziale di membrana aumenta. Nella fase di depolarizzazione il potenziale dei neuroni corticali è vicino alla soglia e si ha una frequenza di scarica comparabile quella dello stato di veglia. Invece, nella fase di iperpolarizzazione il potenziale è negativo e l'attivazione neuronale è pressoché nulla. La fase di iperpolarizzazione coincide dunque con una fase di diminuzione della coscienza.

La diminuzione del grado di coscienza durante il sonno lento è dovuto all'attivazione di due meccanismi. Il primo meccanismo prevede che l'attivazione di neuroni corticali localizzati sia seguita da una fase di iperpolarizzazione dell'area. A causa di ciò le aree del sistema talamocorticale non sono in grado di comunicare correttamente ed il segnale non si propaga ma rimane localizzato ad una singola area. Quindi ciascuna porzione del sistema talamocorticale va a costituire un sistema isolato e le informazioni non vengono integrate.

Nel secondo caso si verifica un'attivazione globale dei neuroni, seguita da una fase di iperpolarizzazione che coinvolge tutte le aree di attivazione, si genera quindi un segnale aspecifico e le informazioni risultano ridotte.

La bistabilità provoca dunque risposte localizzate e omogenee, caratteristiche che non permettono specializzazione ed integrazione delle informazioni.

Durante la fase REM i neuroni risultano attivi, poiché sono in ogni momento depolarizzati e quindi in grado quindi di rispondere ad input. Il livello di coscienza è elevato poiché sono presenti modelli di attivazione differenziati e che coinvolgono diverse aree del sistema talamocorticale.

Per verificare che, durante le fasi del sonno più profondo, vi sia una mancanza di differenziazione ed integrazione dell'informazione, sono stati eseguiti esperimenti che prevedono l'utilizzo

sia della stimolazione transcranica TMS che dell'elettroencefalografia EEG.

Utilizzando la TMS è possibile stimolare una specifica area corticale, mentre con l'utilizzo di elettrodi sullo scalpo è possibile visualizzare la risposta cerebrale globale in seguito alla stimolazione. Quindi, tramite la combinazione di queste analisi, risulta possibile verificare se il sistema talamocorticale è in grado di integrare informazioni, producendo risposte differenziate e riferite a diverse aree cerebrali.

Durante la veglia, si verifica un'attività cerebrale estesa ed allo stesso tempo estremamente specializzata nell'area stimolata dalla TMS, proprio come accade in un sistema in grado di integrare informazioni.

Nel sonno ad onde lente, invece, la stimolazione rimane localizzata nella specifica area corticale come in un sistema isolato. Aumentando l'intensità della stimolazione viene stimolata un'ampia area della corteccia e si osserva una risposta aspecifica, proprio come accade nel caso di sistemi omogenei con un basso grado di informazione.

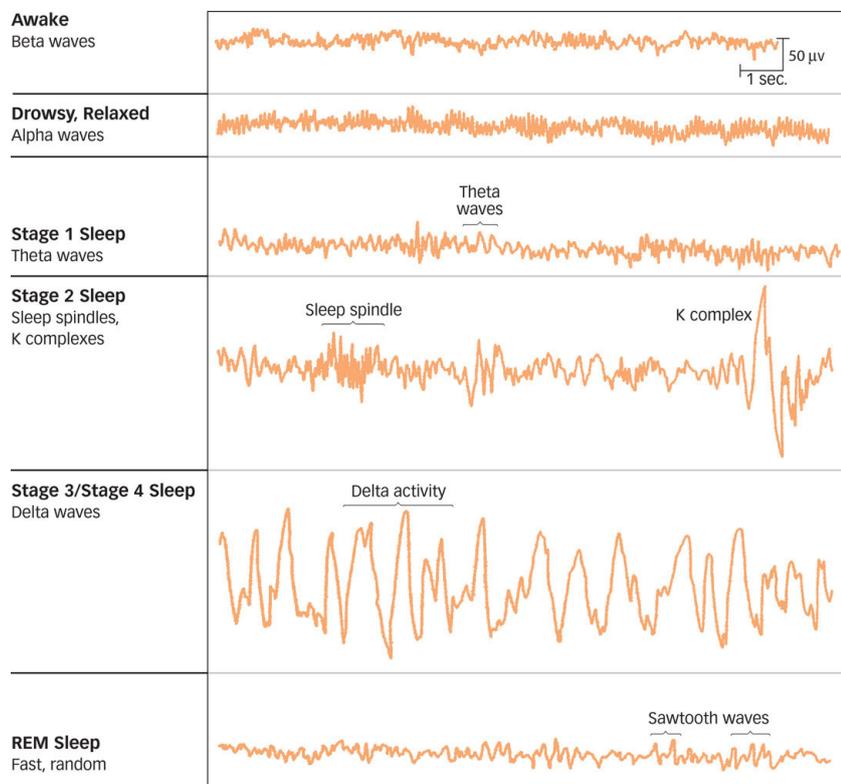


Figura 11: Andamento dell'EEG durante il sonno REM e durante gli stadi del sonno NREM

Nella Figura 11 è possibile vedere l'andamento dell'EEG durante le diverse fasi del sonno, si noti come l'andamento in qualsiasi fase del sonno è caratterizzato dall'alternarsi di picchi positivi e deflessioni negative. Questo andamento dimostra come, i neuroni corticali, durante il sonno si comportino come un sistema bistabile che oscilla, tra la fase di depolarizzazione corrispondente al picco positivo, e la fase di iperpolarizzazione, corrispondente alla deflessione negativa.

4.3 Sonno e consolidamento delle sinapsi

Da un punto di vista energetico sonno e veglia non sembrano differire molto, poiché il corpo se rilassato durante la veglia può riposare la muscolatura, ciò che più trae beneficio dal sonno è l'attività cerebrale. Non è ancora del tutto chiaro quali riserve cerebrali si ricostituiscano durante il sonno, alcune ipotesi tuttavia suggeriscono un rinnovo delle riserve di calcio a livello presinaptico e di glutammato in sede sinaptica.

Il sonno ha un'influenza rilevante sulla memoria e quindi sull'apprendimento, sembra infatti che, durante il sonno, i circuiti nervosi della memoria vengano attivati gradualmente e ripetutamente, tutto ciò è favorito dalla disconnessione che si ha rispetto al mondo circostante riducendo così gli stimoli dalla periferia sensoriale.

Alcune scariche nervose presenti durante la fase REM potrebbero favorire il consolidamento delle sinapsi e ampliare la rete di connessioni, favorendo l'integrazione tra memorie recenti e quelle consolidate in precedenza.

4.4 Ipnosi

Anche l'ipnosi rientra tra quelli che sono gli stati alterati di coscienza, come il sonno, il coma o lo stato confusionale a seguito di un trauma. Il soggetto ipnotizzato è fisicamente rilassato ma vigile e concentra tutta la sua attenzione sull'ipnotizzatore. Si tratta dunque ad uno stato molto simile a quello che si sperimenta quando si è completamente assorti dallo studio o dalla lettura di un libro, non viene persa la coscienza di ciò che accade al di fuori ma è come se il mondo esterno passasse in secondo piano e fossimo meno disposti a percepirlo.

L'ipnosi presenta tre caratteristiche: l'assorbimento, la dissociazione e la suggestionabilità. L'assorbimento è dovuto al fatto che l'individuo è completamente assorto in una percezione o nell'immaginare qualcosa. La dissociazione è legata al fatto che durante l'ipnosi parti dell'esperienza vengono elaborate separatamente. La suggestionabilità è dovuta al fatto che l'individuo ipnotizzato risulta più disposto, di un individuo non ipnotizzato, a seguire le istruzioni che gli vengono date. Il soggetto ipnotizzato presenta caratteristiche psicofisiche contraddittorie, alcune sembrano rimandare al sonno senza sogni, altre allo stato di veglia; si registra infatti un elevato tasso di attenzione ma anche di rilassamento e di sonnolenza. È quindi presente una minore consapevolezza ma un'elevata concentrazione.

Studi di neuroimaging rivelano che l'ipnosi comporta una riduzione dell'attività cerebrale delle aree cerebrali collegate alle percezioni sensoriali dell'ambiente esterno, come se potesse bloccare i sistemi sensoriali nel ricevere alcuni stimoli che distrarebbero il soggetto da tale stato. Inoltre sembrerebbe che l'ipnosi, diminuendo l'attività del talamo, sia in grado di modulare le reti neuronali legate all'elaborazione dello stimolo del dolore ed in questo modo diminuire la percezione del dolore.

5 Confutazione della teoria IIT

La teoria dell'informazione integrata rientra tra le teorie della struttura causale della coscienza. Tali teorie sostengono che, per comprendere se un sistema è cosciente, è necessario verificare come interagiscono i suoi elementi. Se interagiscono secondo determinati meccanismi allora tale sistema è cosciente altrimenti lo è meno o per nulla. Come precedentemente affermato la teoria IIT sostiene che la coscienza sia quantificabile e tale quantità è chiamata Φ , un valore di Φ positivo indica che un sistema è cosciente, mentre un valore di Φ uguale a zero indica che tale sistema è incosciente. In particolare Φ è maggiore di zero nei sistemi ricorrenti, uguale a zero nei sistemi feedforward.

Per comprendere l'argomentazione della confutazione è necessaria una breve introduzione alle reti neurali. Una rete neurale artificiale è un modello di calcolo che prova ad emulare le modalità di interazione del sistema nervoso. Una classe di reti neurali artificiali è costituita dalle reti neurali ricorrenti in cui sono presenti cicli di retroazione, che permettono loro di avere in memoria l'elaborazione di input passati. In questo modo l'output viene calcolato considerando l'input corrente e ciò che si ha appreso dagli input precedenti. Una rete neurale feedforward è invece una rete in cui le informazioni fluiscono in un'unica direzione dall'input all'output.

Le reti neurali ricorrenti e feedforward sono approssimatori universali di funzioni, ovvero sono in grado di approssimare qualunque funzione continua. Grazie a questa proprietà tali reti neurali risultano estremamente flessibili e potenti nel modellare ed adattarsi ad una vasta gamma di dati. In particolare, una funzione implementata da una rete ricorrente può essere approssimata arbitrariamente bene anche da una rete feedforward. Ciò viene chiamato *unfolding* ovvero dispiegamento: una qualsiasi rete ricorrente che implementa una funzione può dispiegarsi in una rete feedforward che esegue tale funzione con approssimazione arbitrariamente buona.

Per la proprietà di approssimazione universale ci sono infinite reti feedforward e reti ricorrenti in grado di implementare funzioni input-output; in generale, è quindi possibile dire che esistono infinite configurazioni di reti che possono implementare tali funzioni. Questo implica che la stessa funzione può essere eseguita sia da reti ricorrenti che hanno un valore di Φ positivo, sia da reti feedforward che, hanno un valore di Φ nullo.

Questo ha delle conseguenze sulla validità della teoria IIT, se una qualsiasi rete ricorrente può dispiegarsi in una rete feedforward che implementa la medesima funzione, allora per un sistema ricorrente (con Φ maggiore di zero) che implementa una funzione, vi è anche un sistema feedforward (con Φ nullo) che implementa la medesima funzione. Tale implicazione vale anche nella forma contraria, per ogni sistema con Φ nullo vi è un sistema con Φ positivo. Quindi, per un sistema che ha un valore di Φ positivo, poiché presenta le caratteristiche di differenziazione e integrazione delle informazioni, ci sarà anche un sistema equivalente che falsifica ciò.

È noto che la teoria IIT afferma che la coscienza passi da un valore basso durante sonno ed uno più alto nello stato di veglia. Secondo ciò che è stato detto precedentemente, reti neurali con un valore di Φ uguale zero possono corrispondere allo stato di veglia e reti con Φ positivo possono corrispondere allo stato di sonno. Quindi i sistemi causali su cui si fonda l'IIT non risultano essere né necessari né sufficienti, sono quindi *doppiamente dissociati* dai dati empirici [5].

È bene riportare che tale confutazione della teoria IIT, chiamata UA (*Unfolding Argument*), si basa su alcune premesse: la prima premessa è che la scienza si fonda su misure empiriche che nel caso della coscienza sono le analisi riguardo esperienze soggettive; la seconda premessa riporta che due sistemi che presentano il medesimo meccanismo input-output non sono distinguibili tramite esperimenti che si fondano su misure fisiche; la terza premessa costituisce una precisazione della precedente e sostiene che non è possibile considerare il monitoraggio dell'attività cerebrale come misura fisica per definire a priori lo stato di coscienza di un individuo, perché ciò che si sta indagando è prima di tutto è lo stesso substrato cerebrale della coscienza. Quindi, dal momento che, qualsiasi funzione implementata da una rete ricorrente può essere implementata anche da una rete feedforward, potrebbero esserci delle reti feedforward che si comportano come un cervello umano cosciente, rispondendo a stimoli sensoriali e presentando le medesime caratteristiche di un umano durante la veglia e il sonno.

Ponendo ad esempio che il sistema cerebrale di elaborazione del suono, un sistema ricorrente, venisse sostituito con un sistema feedforward impiantato mediante intervento chirurgico. Per il fatto che, un sistema ricorrente può essere dispiegato in uno feedforward che svolge la medesima funzione, le altre aree del cervello non noterebbero la sostituzione e l'esperienza sensoriale dell'individuo rimarrebbe inalterata. Poiché l'esperienza sensoriale e la trasmissione nervosa risulta invariata, i due sistemi risultano empiricamente indistinguibili. Il fatto che, un sistema cosciente risulti empiricamente indistinguibile da uno incosciente, rimarca ancora una volta l'invalidità di tale teoria.

5.1 Sistemi causali e misurazione del grado di coscienza

Il cervello umano per funzionare correttamente deve essere in grado di elaborare segnali provenienti da aree cerebrali diverse. Ciò deve poter avvenire con un numero limitato di neuroni, contenendo il consumo energetico e all'interno di struttura fisica limitata alla grandezza del cranio. In seguito ad alcuni esperimenti sulle reti neurali si è constatato che, le reti ricorrenti, sono in grado di implementare funzioni più efficacemente e richiedendo un minor numero di neuroni rispetto alle reti feedforward. Esse dunque rispondono meglio alle esigenze che il cervello umano ha per funzionare correttamente.

La teoria IIT, che si basa su come le parti di un sistema interagiscono per verificare lo stato di coscienza, sembrerebbe essere un buon quantificatore di coscienza. Un valore alto di Φ indica che il sistema è in grado integrare correttamente le informazioni e quindi di elaborarle in maniera efficace, proprio come un sistema ricorrente. Per questo motivo la teoria IIT, basata sulla struttura causale, prevede che i sistemi ricorrenti siano sempre consci mentre i sistemi feedforward non lo siano mai. Tuttavia, il cervello umano funziona come una rete ricorrente perché l'elaborazione degli stimoli deve mantenersi entro un limite spaziale, ma non perché la coscienza sia una rete neurale ricorrente come il cervello.

Quindi, in generale tale teoria è in grado di quantificare la coscienza poiché si basa sulla capacità di un sistema di elaborare le informazioni, ma non perché tali sistemi abbiano la stessa struttura che ha la coscienza.

5.2 Le esperienze in prima persona possono fungere da base empirica per l'IIT?

L'UA ha riscosso non poche critiche da parte dei sostenitori della teoria IIT. Essi ritengono che lo studio della coscienza si basa su delle verità, ovvero le esperienze coscienti vissute in prima persona. Infatti, tali vissuti personali sono in grado di mostrare che la coscienza è integrata. Quindi, poichè l'esperienza in prima persona è in grado di fungere da base per l'assioma dell'integrazione delle informazioni e poichè la misura di Φ deriva da tale assioma, allora l'IIT basandosi sull'esperienza personale riscontra una base scientifica in tale verità. Essi ritengono dunque non necessario ricercare altre basi in dati di terze persone [7]. È bene precisare che il termine dati di terze parti indica tutto ciò che è misurabile empiricamente, osservabile e condivisibile da altri, le teorie per essere valide devono quindi basarsi su tali dati che devono essere condivisibili da altri.

I sostenitori dell'UA ritengono quindi necessario indagare il termine "esperienza in prima persona". È noto che, tutti gli esperimenti psicologici volti ad indagare la coscienza, si basano su ciò che i partecipanti riportano riguardo la loro esperienza soggettiva. Se ad esempio hanno percepito uno stimolo o se osservando un'immagine notano una particolare caratteristica. Tali esperimenti trovano necessariamente una base nell'introspezione, ovvero su ciò che l'individuo sperimenta. I dati che riportano l'esperienza introspettiva dei partecipanti, poichè comunicati, diventano quindi necessariamente dati in terza persona, osservabili e confrontabili, quindi soggetti all'Unfolding Argument. Invece "la pura esperienza in prima persona" fa riferimento ad un'esperienza che rimane inaccessibile, ovvero sperimentabile solo dal soggetto e non riportata a terze parti. Essi risultano quindi dati non osservabili e confrontabili, e per questo, non scientifici.

I sostenitori dell'UA ritengono che gli esperimenti basati sulle esperienze soggettive sono dati in terza persona e per questo appartenenti al campo dell'UA; mentre, le uniche esperienze in grado di supportare l'IIT sono quelle puramente personali, che risultano però non scientifiche. In conclusione, l'IIT, basandosi sull'esperienza in prima persona, non può sottrarsi dall'essere oggetto dell'UA.

5.3 Esperimenti in grado di misurare il grado di coscienza

A questo punto ci si potrebbe chiedere se esperimenti, basati su dati empiricamente osservabili e confrontabili ed in grado di misurare lo stato di coscienza di un sistema, possano sostenere l'IIT.

I sostenitori dell'UA affermano che il motivo per cui tali esperimenti supportano l'IIT, probabilmente, risiede nel fatto che si basano sulla misura della capacità di un sistema di elaborare informazioni. La quale è una condizione necessaria affinché sistema sia cosciente. Tuttavia, la capacità di un sistema di integrare informazioni non implica che il substrato fisico della coscienza equivalga a tale sistema. Dunque l'IIT fornisce una buona misura sull'efficienza di un sistema nell'integrare informazioni. Un valore basso di Φ indica un'interazione non efficiente,

mentre un alto valore di Φ indica una buona capacità d'integrazione (ciò è scientificamente valido poichè l'efficienza di un sistema è empiricamente testabile). Al contrario, non vi sono dati empirici in grado di sostenere che, non costituendo un sistema in grado di integrare informazioni, un fotodiodo o una fotocamera non siano coscienti. Infatti, come si è precedentemente affermato, teorie della coscienza basate su come interagiscono le parti di un sistema, non sono verificabili tramite dati empirici.

L'IIT può essere quindi ritenuta una teoria valida se ci sofferma solo sulla sua mera capacità di verificare se un sistema è in grado di integrare informazioni; mentre, nel momento in cui tale teoria considera la coscienza correlata a tale capacità essa risulta priva di validità scientifica.

6 Conclusione

La teoria IIT basa il suo studio sulla coscienza partendo da un'indagine dell'esperienza per poi trarre una conclusione fondamentale: un sistema cosciente è un sistema in grado di integrare informazioni. Quindi la coscienza dipende esclusivamente dal modo in cui gli elementi di un sistema interagiscono tra di loro, se le parti di un sistema interagiscono secondo certi meccanismi esso è cosciente, altrimenti poco o nulla. Ciò permette dunque di quantificare la coscienza di un sistema e tale valore è chiamato Φ . Se un sistema risponde ai requisiti di coscienza posti dalla teoria IIT presenta un valore di Φ positivo ed è cosciente, altrimenti se Φ è nullo non è cosciente.

Secondo tale teoria la coscienza non ha sede in una particolare zona cerebrale ma è generata dalla cooperazione di numerose aree cerebrali. Ne consegue che, l'impossibilità di comunicare verbalmente l'esperienza cosciente, non implichi che tale sistema non sia cosciente. Ciò è riscontrabile in particolari condizioni neurologiche dove l'incapacità comunicativa non preclude lo stato di coscienza.

Stati alterati di coscienza, come ad esempio il sonno, in cui in alcune fasi vi è una netta diminuzione della coscienza, o l'ipnosi, in cui essa si conserva ma si manifesta diversamente, mostrano come la coscienza non risponda ad una legge del tipo tutto o nulla, ma sia graduale. La plasticità sinaptica risulta quindi strettamente connessa a tale caratteristica della coscienza dimostrandolo, da un punto di vista fisiologico, come essa vari in base agli stimoli ambientali. È possibile concludere che probabilmente lo sviluppo della coscienza è correlato all'evoluzione biologica. Essa infatti costituisce un vantaggio adattativo permettendo all'individuo di integrare le informazioni, quindi di avere un repertorio sempre maggiore di variabili da considerare per guidare l'istinto.

L'IIT sebbene rispecchi bene il probabile sviluppo della coscienza da un punto di vista neuroanatomico e neurofisiologico, viene confutata e quindi ritenuta scientificamente non valida dall'Unfolding argument (UA). Tale argomentazione utilizza le reti neurali per dimostrare che sistemi coscienti, ovvero che presentano un valore di Φ positivo, e sistemi incoscienti possano essere empiricamente indistinguibili. Ciò comporta che l'IIT sia necessariamente falsa poiché prevede che lo stato di coscienza di sistemi con Φ positivo sia diverso rispetto allo stato di co-

scienza di sistemi che presentano un valore di Φ uguale a zero.

I sostenitori della teoria proposta da Tononi affermano che essa ritrovi le sue basi scientifiche nell'esperienza personale. Infatti ciascun individuo sperimenta in ogni momento la capacità integrativa della coscienza, verità su cui si basa l'IIT. Tuttavia anche l'esperienza personale, poiché comunicata e verificabile empiricamente, risulta soggetta all'UA. Quindi anche esperimenti basati sul vissuto soggettivo non sono in grado di fungere da base. In generale, è quindi possibile concludere che l'IIT è una teoria in grado di verificare la capacità di un sistema di integrare le informazioni e quindi la sua efficienza. Risulta però priva di dati empirici e quindi scientificamente non valida nel momento in cui la capacità di integrazione risulti correlata alla coscienza.

L'IIT rimane comunque una delle teorie della coscienza più precise nel prevedere il livello di coscienza di un sistema, tuttavia essa ritiene che l'integrazione, un aspetto necessario alla formazione dell'esperienza cosciente, sia anche sufficiente e ciò risiede fuoridal regno della scienza. Poiché le teorie sulla coscienza che si basano su come interagiscono gli elementi di un sistema sono soggette all'UA, nello studio della coscienza è necessario concentrarsi non tanto sulla capacità di un sistema di integrare informazioni ma sul tipo di informazioni che esso integra.

L'UA suggerisce che, lo studio dell'esperienza cosciente, non dovrebbe soffermarsi su come un sistema è in grado di implementare funzioni, ma su quali tipi di funzioni sono correlate alla coscienza.

È quindi necessario cambiare il punto di vista e fondare lo studio della coscienza a partire da ciò che essa produce.

7 Bibliografia

- [1] Giulio Tononi, *PHI. Un viaggio dal cervello all'anima*, Torino, Codice Edizioni, 2014
- [2] Giulio Tononi, *An information integration theory of consciousness*, BMC neuroscience 5 (2004), pg. 1-22
- [3] Talis Bachmann, *Microgenetic Approach to the Conscious Mind*, Amsterdam, John Benjamins Publishing Company, 2000
- [4] Fiorenzo Conti, *Fisiologia medica*, Milano, Edi.Ermes, 2010
- [5] Adrien Doerig, Aaron Schurger, Kathryo Hess, Michael H. Herzog, *The Unfolding argument: Why IIT and other causal structure theories cannot explain consciousness*, Consciousness and cognition 72 (2019), pg. 49-59
- [6] Herzog, Michael H., Aaron Schurger, and Adrien Doerig, *First-person experience cannot rescue causal structure theories from the unfolding argument*, Consciousness and Cognition 98 (2022)
- [7] Vanhaudenhuyse, Audrey, Steven Laureys, M-E. Faymonville, *Neurophysiology of hypnosis*, Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology 44.4 (2014), pg. 343-353
- [8] Placidi, Fabio, and Andrea Romigi, *Neurofisiologia del sonno e tecniche di analisi*, Noos 10.1 (2004), pg. 7-14
- [9] https://www.aism.it/sclerosi_multipla.1%E2%80%99importanza_della_plasticit%C3%A0_sinaptica_contrastare_i_danni_della_malattia, consultato il 12/08/2023