

Passato presente e futuro delle neuroscienze e del diritto

Past present and future of neuroscience and law

Gabriella Bottini¹⁻² • Anna Sedda¹ • Daniela Ovadia²

Parole chiave: Neuroscienze forensi • neuropsicologia cognitiva • neuroimaging • razionalità • emozioni

Riassunto

Negli ultimi anni si è assistito ad una progressiva crescita nell'interazione tra Diritto e Neuroscienze, grazie anche al progresso delle Neuroscienze Cognitive e all'avvento di strumenti di neuroimaging volti all'esplorazione di aspetti morfologici e dinamici del cervello. La domanda fondamentale è fino a che punto il contributo delle Neuroscienze possa modificare il comportamento degli uomini di legge. In questa review, esponiamo il panorama neuroscientifico attuale e le aspettative del Diritto nei confronti delle Neuroscienze.

Keywords: Forensic neuroscience • cognitive neuropsychology • neuroimaging • rationality • emotions

Summary

Recent years have been characterized by a gradual increase in the interaction between Law and Neuroscience, thanks to the advancement of Cognitive Neuroscience and to the advent of neuroimaging tools aimed at exploring the morphological and dynamic aspects of the brain. The fundamental question is to what extent the contribution of Neuroscience can change the behavior of lawyers. In this review, we summarize the current neuroscientific evidences and the expectations of the Law in respect of Neuroscience.

Per corrispondenza: Prof. G. Bottini, Department of Brain and Behavioural Sciences, Università degli Studi di Pavia, Piazza Botta 11, 27100 Pavia • g.bottini@unipv.it.

1 Department of Brain and Behavioural Sciences, Università degli Studi di Pavia, Pavia.

2 Centro di Neuropsicologia Cognitiva, Ospedale Niguarda Ca' Granda, Milano.

1. Introduzione

Negli ultimi anni si è assistito ad una progressiva crescita dell'interesse da parte del Diritto nei confronti delle Neuroscienze.

L'interazione tra Diritto e discipline quali l'Antropologia, la Filosofia, la Psicanalisi e la Neuropsichiatria è sempre stata molto intensa, considerando il comune interesse per temi complessi quali il libero arbitrio, la responsabilità morale, le competenze intellettive con specifico riferimento per esempio al problema dell'imputabilità.

Tuttavia, il progresso delle Neuroscienze Cognitive, segnato dallo sviluppo di diverse specializzazioni come la Neuropsicologia e la Neurofisiologia, nonché l'avvento di strumenti volti all'esplorazione di aspetti morfologici e dinamici del cervello, ha intensificato tale interazione e ha determinato un incremento di quesiti specifici da parte degli operatori di legge nei confronti delle diverse figure che sono attive nei vari settori neuroscientifici, sul ruolo del cervello nella modulazione di comportamenti complessi rilevanti a livello sociale e politico.

Proprio questo tipo di richieste distingue con nettezza l'interazione tra Neuroscienze e Diritto. Mentre infatti, nel caso di ambiti quali la Filosofia, l'Estetica, l'Economia è prevalente una matrice teorico-speculativa, per il Diritto, le implicazioni immediatamente pratiche sono facilmente e rapidamente intuibili sia in ambito civile sia in ambito penale.

La domanda fondamentale è fino a che punto il contributo delle Neuroscienze possa modificare il comportamento degli uomini di legge, e quanto siano disposti gli uomini di legge a cambiare il loro comportamento.

2. Le domande del diritto alle neuroscienze

Uno dei fondamenti del diritto è individuare la *mens rea*, intendendo con questo concetto il connotato psicologico del crimine, ovvero se l'individuo che ha commesso il reato sia consapevole delle sue azioni, se ci sia intenzionalità o premeditazione (Goldstein, Morse, & Shapiro, 2003). In altre parole, si vuole individuare se vi sia responsabilità legale (Jefferson, 2007). La responsabilità legale è, per il Diritto, strettamente connessa alla "razionalità" dell'individuo. La definizione di razionalità identifica questo termine con qualcosa che è fondato su un ragionamento rigoroso e sistematico (Sabatini & Coletti, 2005). L'assunto di base è che, se l'individuo è razionale, allora è colpevole, se non lo è, allora la colpa è del "suo cervello", ovvero di disturbi organici che ne hanno compromesso la razionalità (Morse, 2004). Poiché la razionalità è il metro di giudizio per la responsabilità legale (Morse, 2004), il Diritto potrebbe chiedere alle Neuroscienze se l'individuo imputato sia o meno razionale.

Il problema di questo quesito sta nello stesso concetto di razionalità, che assume per le Neuroscienze un significato del tutto peculiare rispetto a quello che ha per i giuristi. Un individuo unicamente razionale è infatti un individuo disfunzionale dal punto di vista delle Neuroscienze, in quanto, sin dai primi studi del Neuroscienziato Damasio e dei suoi collaboratori (Damasio, 2005), è stato dimostrato come la mancanza di emozioni e il prevalere della razionalità corrisponda a tutti gli effetti a una grave condizione patologica cerebrale. L'esempio più eclatante di questa condizione è rappresentato dai pazienti con lesioni delle aree prefrontali, il cui prototipo emblematico è l'oramai celebre Phineas Gage. I pazienti come lui, privati della loro parte emotiva (intesa anche come controllo sulle emozioni) (Macmillan, 1992), conservano appieno la razionalità, cioè il pensiero logico, ma non sono in grado di applicarla in modo adeguato cioè finalistico, ai fatti quotidiani. Conoscere che cosa è giusto, corretto, legale, è infatti inutile se non si conosce anche la valenza emotiva delle conseguenze delle proprie azioni. Anche nei pazienti con patologia psichiatrica, in cui le aree prefrontali possono essere disfunzionali, è stata dimostrata un'estesa compromissione dell'elaborazione cognitiva delle emozioni. Questi pazienti, diversamente dai soggetti normali, non mostrano variazioni dell'attività elettrica cerebrale (indicatrice di una significativa elicitazione del cervello) quando per esempio gli viene presentata una parola con contenuto emotivo "forte" (valenza emotiva) piuttosto che una parola neutra (es. la parola "cicatrice" rispetto alla parola "cancello") (Kiehl, 2006). I cambiamenti elettrici di cui sopra, segnalerebbero l'avvenuta elaborazione della prosodia emotiva che varia al variare del significato delle parole, e la loro assenza segnalerebbe che disfunzioni nella zona prefrontale comportano un disturbo nella comprensione ed elaborazione di tale significato emotivo (Kiehl, 2006).

Chiedersi se un individuo sia razionale assume dunque un significato per il Diritto e un altro significato ben diverso per le Neuroscienze. Per le Neuroscienze il quesito potrebbe essere: questo individuo è razionale ed emotivo? Intendendo con emotivo un individuo in grado di gestire, e integrare le informazioni razionali in un contesto che tenga conto anche delle emozioni come guida nell'interazione con gli altri: agire anche emotivamente vuole dire per esempio essere in grado di inibire una pulsione emotiva in quanto inadeguata. Dato per assunto quindi che la domanda reale del Diritto non è se l'individuo sia razionale, il quesito fondamentale resta se l'individuo abbia agito *volutamente* e nel *pieno controllo del suo comportamento*.

Strettamente connesso alla volontà di agire e al controllo del comportamento è il concetto di "free will", ovvero di libero arbitrio. Recentemente le Neuroscienze hanno approfondito questo concetto, abbracciando talvolta in maniera molto critica una filosofia più deterministica, che suggerisce che le azioni vengano programmate ben prima

che l'individuo ne sia consapevole (Cashmore, 2010; Soon, Brass, Heinze, & Haynes, 2008). Tuttavia, è possibile considerare che la consapevolezza esplicita, cioè l'abilità di dichiarare semanticamente che cosa si vuole fare, non è totalmente sovrapponibile al libero arbitrio, e quindi il concetto di free will non va rigettato ma semplicemente ripensato alla luce dei complessi calcoli probabilistici che i neuroni cerebrali svolgono per compiere le azioni (Brembs, 2011; Roskies, 2010).

Il concetto di azione volontaria, inoltre, fa riferimento non solo al free will ma si estende al ventaglio delle numerose patologie neuropsichiatriche che causano la parziale o totale perdita di volontà, intesa come capacità di decidere, si faccia riferimento per esempio alla demenza che in modo progressivo e devastante annulla l'autonomia dell'individuo (Gleichgerricht, Ibanez, Roca, Torralva, & Manes, 2010). In questi casi non solo il paziente non è in grado di esplicitare che cosa vuole fare, ma sembra venir meno il concetto stesso di volere (fare) qualcosa, uno dei sintomi tipici della malattia può infatti essere l'apatia (Chase, 2011). Il controllo del proprio comportamento quindi è strettamente legato alla volontarietà delle azioni, ed è quasi impossibile scindere le due cose.

Esistono varie situazioni dove l'individuo, per le Neuroscienze, non agisce in maniera volontaria. L'esempio più noto, forse anche per l'ambito del Diritto sono le anomalie comportamentali indotte artificialmente dall'abuso di sostanze stupefacenti, siano esse alcolici o droghe (e in alcuni casi anche farmaci). L'utilizzo di droghe per esempio può compromettere la velocità di reazione agli stimoli e può causare disinibizione, intesa come incapacità di valutare le conseguenze delle proprie azioni (Lucantonio, Stalnaker, Shaham, Niv, & Schoenbaum, 2012). In generale, droghe e alcool possono provocare questi effetti agendo sia a livello corticale nelle zone frontali e prefrontali (Lucantonio et al., 2012), sia a livello sottocorticale su quelle strutture che fanno parte del sistema limbico e quindi governano le emozioni (Stalnaker et al., 2007). Più di recente il Diritto ha preso atto che anche alcune patologie organiche come le demenze e i traumi cranici possono essere causa di questi sintomi e comportamenti, portando l'individuo a commettere azioni improprie e a causare danni ad altri individui.

Il reale quesito per le Neuroscienze potrebbe quindi nuovamente mutare in una richiesta di screening per quelle *patologie* che compromettono il free will e il controllo del comportamento.

Questo genere di quesiti riguarda la sentenza, ma il Diritto pone alle Neuroscienze anche delle domande che riguardano le fasi successive alla decisione sulla colpevolezza. Il sistema di giustizia può infatti prevedere due tipi di ragioni per "punire" i colpevoli: una pena basata sulla retribuzione oppure una pena basata sul deterrente. Nel primo caso, per il reo c'è garanzia di una pena che sia proporzionata alla gravità del reato commesso. Nel secondo caso il principio è di punire il reo in modo tale da scoraggiare altri individui dal commettere lo stesso reato. In questi casi, il Diritto potrebbe voler sapere dalle Neuroscienze quanto valga la pena di applicare una pena di tipo deterrente piuttosto che una di tipo retributivo. Riprendendo come esempio i pazienti con danno al lobo frontale, non avrebbe senso applicare pene di tipo deterrente, in quanto tali individui

con lesioni cerebrali, non sono in grado in ogni caso di frenare i loro impulsi benché consapevoli di rischiare un' eventuale pena (Damasio, 2005; Kiehl, 2006). Queste persone infatti potrebbero tranquillamente affermare di comprendere a livello razionale le conseguenze, per esempio di un' aggressione, ma tuttavia non sarebbero in ogni caso in grado di frenarsi dal compierla.

In conclusione le principali, ma non uniche, domande che il Diritto pone alle Neuroscienze riguardano l'individuazione della *mens rea* negli individui sottoposti a processo, ovvero della loro capacità di comprendere le conseguenze delle loro azioni, e di conseguenza quale tipo di pena, retributiva o deterrente, possa avere senso applicare.

Dal punto di vista delle Neuroscienze queste domande riguardano vari domini, come quello delle patologie dementi irreversibili (malattia di Alzheimer), del "mind reading" (come nel caso della detenzione di menzogne, o di pregiudizi consci o inconsci), del trattamento psichiatrico o neurologico in caso di criminali, del controverso effetto dei potenziatori cerebrali e della responsabilità morale.

È importante considerare che l'utilizzo di metodi neuroscientifici nell'ambito del Diritto non è una scelta opzionale, come si potrebbe ritenere. Nel caso, per esempio, delle patologie dementi è impossibile quantificare in maniera univoca e oggettiva l'impatto che queste possono avere sulla vita della persona senza ricorrere a delle misurazioni oggettive e standardizzate come quelle neuropsicologiche. Similmente, la presenza di pregiudizi sociali, per esempio nei confronti di altre etnie, non è sempre rilevabile in maniera esplicita, ma spesso solo attraverso paradigmi come quelli di priming, che rilevano atteggiamenti impliciti attraverso misure tangenziali (Cameron, Brown-Iannuzzi, & Payne, 2012). Il Diritto non può quindi che abbracciare le metodologie neuroscientifiche.

3. Le neuroscienze cognitive: metodi e strumenti per rispondere ai quesiti

Tra i vari domini delle Neuroscienze, quelle cognitive rappresentano il settore che si occupa di comprendere quali aree cerebrali sottendono ai nostri comportamenti, ai nostri processi mentali e alle nostre azioni in quanto esseri umani. Spesso le Neuroscienze cognitive si avvalgono di strumenti avanzati per l'esplorazione in vivo del cervello. A livello morfologico questi strumenti permettono di definire la profondità e l'estensione di un danno cerebrale, mentre a livello funzionale consentono di visualizzare su delle mappe di attivazione quali aree cerebrali sottendono determinati processi cognitivi. Tra gli strumenti di inestimabile valore morfologico si possono annoverare la Tomografia ad Emissione di Positroni (PET) e la Risonanza Magnetica (RM), mentre la Risonanza Magnetica Funzionale (fMRI) è forse la più nota tecnica di neuroimaging funzionale, grazie alla sua non invasività combinata ad un' ottima risoluzione spaziale (Ogawa, Menon, Kim, & Ugurbil, 1998). Soprattutto l'fMRI, nel corso degli ultimi anni, ha permesso di aggiungere nuove e importanti conoscenze al funzionamento cerebrale, sebbene questa tecnica non sia scevra da critiche, anche rilevanti, a causa della notevole competenza statistica che è necessaria, non solo per elaborarne i dati, ma anche

per comprenderne i risultati (Stephan, Harrison, Penny, & Friston, 2004). L'idea di base della fMRI e delle altre tecniche non deve essere di tipo localizzazionista, bensì deve considerare il cervello come un network di aree interconnesse che collabora in maniera sinergica, sebbene ancora oggi sia difficile trovare una definizione operativa univoca di connettività funzionale (Horwitz, 2003). Seguendo il principio della connettività funzionale gli ultimi anni stanno vedendo un notevole sviluppo di nuove tecniche basate sull'fMRI come la Trattografia (Diffusion Tensor Imaging, DTI), che permette di visualizzare le connessioni tra le fibre e quindi verificare eventuali disconnessioni tra aree, tecnica che ha trovato numerose applicazioni per esempio nel caso delle patologie demenziali e degenerative (Catani, 2006; Nucifora, Verma, Lee, & Melhem, 2007).

Tali strumenti hanno consentito proprio nell'ambito del Diritto di considerare alcuni casi anche alla luce di aspetti biologici del comportamento umano. A titolo esemplificativo si può considerare il fatto che nel sistema giudiziario se un minore commette un reato, viene punito in maniera "minore" rispetto ad un adulto. Questo dato ha trovato più di una conferma nei lavori neuroscientifici svolti sulle popolazioni in età evolutiva (Velanova, Wheeler, & Luna, 2009). Illuminante a tal proposito è il caso dello sviluppo graduale delle funzioni di controllo o inibitorie, che servono negli adulti per guidare vari generi di comportamenti finalizzati (Luna, Garver, Urban, Lazar, & Sweeney, 2004; Luna et al., 2001). Per esempio, attraverso test visuo-motori di controllo attentivo esogeno ed endogeno su adulti e adolescenti è stato dimostrato che questi ultimi, nelle prove di tipo endogeno e inibitorio, mostrano più difficoltà e impiegano più tempo nel rispondere (Velanova et al., 2009). In questi esperimenti soggetti dovevano, a seconda delle istruzioni fornite dall'esaminatore prima dell'inizio dell'esperimento stesso, guardare dei pallini gialli proiettati casualmente sullo schermo di un computer (attenzione esogena e involontaria), oppure distogliere lo sguardo da essi (attenzione endogena e volontaria). Inoltre, è stato dimostrato attraverso tecniche di neuroimaging che gli adolescenti attivano più estesamente la corteccia prefrontale rispetto ad adulti, dimostrando che le strutture cerebrali non sono ancora perfettamente integrate tra loro (Velanova et al., 2009).

Vi sono oramai numerose evidenze che confermano che il cervello del bambino e dell'adolescente non corrisponda in toto a quello dell'adulto, in cui una vasta serie di aree, che include la corteccia cingolata anteriore, il giro frontale inferiore, la corteccia dorso-laterale frontale, e la corteccia parietale posteriore, oltre ai frontal eye fields e a strutture sottocorticali come i gangli della base (Curtis, Cole, Rao, & D'Esposito, 2005; Rubia, Smith, Brammer, & Taylor, 2003). Il cervello modifica nel corso dell'evoluzione le interconnessioni tra le aree, principalmente tra le strutture frontali e quelle subcorticali, per arrivare a formare quello è il network cerebrale che permette il controllo e l'inibizione degli stimoli (Hwang, Velanova, & Luna, 2010). Restano ancora numerosi interrogativi da chiarire rispetto a quali siano le più importanti diversità dal punto di vista funzionale e soprattutto quale sia il loro impatto sul funzionamento sociale, al di fuori del laboratorio, e rispetto a quali siano i passaggi fondamentali per un corretto sviluppo delle connessioni cerebrali necessarie per raggiungere una per-

formance ottimale nell'età adulta (Luna, Padmanabhan, & O'Hearn, 2010).

L'esempio della pena verso il minore, resta tuttavia un buon esempio di come le Neuroscienze possano da un lato confermare le ipotesi del Diritto, fornendo dall'altro lato ulteriori strumenti prospettando nuovi spunti di riflessione e di dubbio su alcune affermazioni forse eccessivamente categoriche rispetto al comportamento umano (si fa soprattutto riferimento alla rigida dicotomia razionalità – emotività). Poiché il contributo che le Neuroscienze apporteranno non sarà di chiaroveggenza, alcuni sostenitori della visione critica dell'applicazione delle Neuroscienze al Diritto hanno affermato che non si verificheranno cambiamenti epocali (Morse, 2004). Tuttavia, sebbene le tecniche a disposizione delle Neuroscienze non permetteranno di leggere la mente delle persone che commettono atti criminali, saranno però sicuramente chiarificatrici su eventuali disfunzioni, sia a livello macroscopico sia microscopico, che possono aver portato l'individuo ad agire, seppur 'volontariamente', in realtà al di fuori del suo controllo e senza l'intenzione di ledere socialmente.

4. Le risposte allo stato attuale: limiti e prospettive

L'esempio più appropriato per descrivere prospettive e limiti di queste tecniche è rappresentato dallo studio di un grande mistero clinico quale quello dello stato vegetativo. Mistero poiché soggetti in tale condizione causata da una grave lesione cerebrale, manifestano una riduzione dello stato di coscienza (Bernat, 2006). Si possono in realtà distinguere diversi gradi di alterazione dello stato di coscienza, dalla confusione mentale transitoria causata dalla lieve commozione cerebrale allo stato vegetativo (VS) e lo stato di minima coscienza (MCS) (Bernat, 2006). Esistono diversi strumenti comportamentali per valutare lo stato di coscienza dei pazienti, come la Glasgow Coma Scale (GCS) (Giacino, Kalmar, & Whyte, 2004) o la JFK Coma Recovery Scale-Revised (JFK) (Teasdale & Jennett, 1974). Tuttavia, questi strumenti sono molto sensibili alla variazione inter-operatore, e non sempre quindi, danno risultati attendibili al 100% (Gawryluk, D'Arcy, Connolly, & Weaver, 2010). La presenza di un residuo di coscienza e la predittibilità sul suo recupero sono argomenti di notevole interesse anche per il Diritto, come dimostrato dagli accesi confronti sulle decisioni di fine vita. Utilizzando il classico approccio neuropsichiatrico o approcci comportamentali infatti è difficile confermare in maniera univoca il livello dello stato di coscienza di questi pazienti.

Il neuroimaging morfo-funzionale potrebbe aprire nuove prospettive non solo per le Neuroscienze ma anche per il Diritto in questo campo molto complesso. I primi studi degli anni '80 hanno mostrato per esempio una riduzione nel metabolismo cerebrale del glucosio nei pazienti VS (Levy et al., 1987). Questi studi sono proseguiti nel tempo, portando a scoprire per esempio delle differenze tra i pazienti VS e i pazienti con MCS, confermando una nosologia indifferenziata fino ad allora solo attraverso un'osservazione clinica non completamente standardizzata (Bruno, Vanhaudenhuyse, Thibaut, Moonen, & Laureys, 2011). Di ancor più notevole rilevanza sono gli studi di attivazione

cerebrale con la fMRI, che hanno dimostrato in pazienti incapaci di muoversi o di esprimersi verbalmente un residuo di coscienza inferibile attraverso i cambiamenti dell'attività cerebrale in aree specifiche sovrapponibili a quelle dei soggetti senza alterazione dello stato di coscienza (soggetti di controllo) (Owen et al., 2005; Owen et al., 2002).

Sebbene promettenti, questi studi sono però ancora preliminari, in quanto è molto difficile stabilire univocamente la presenza di coscienza e inoltre vi sono notevoli variazioni interindividuali (Laureys, Perrin, Schnakers, Boly, & Majerus, 2005). Questi limiti, ben noti alle Neuroscienze, non spesso sono assimilabili tout court dagli operatori del Diritto. Inoltre a monte di questo vi è un argomento ben più rilevante che riguarda il concetto stesso di coscienza, che include anche i suoi correlati biologici, che dimostrano quanto dal punto di vista neuroscientifico essa non rappresenti un'unità funzionale inscindibile (de Graaf, Hsieh, & Sack, 2012).

Conclusioni

Quanto fin qui esposto, spiega che il contributo delle Neuroscienze potrebbe influenzare il comportamento degli uomini di legge, e questo proprio perché sono gli stessi operatori di questo campo a richiederlo. Sebbene la strada da percorrere per ottenere delle prove certe da utilizzare in maniera miliare in tribunale sia ancora lunga, gli scambi iniziali tra Neuroscienze e Diritto sembrano promettenti considerando il comune interesse per i comportamenti umani complessi sebbene da punti di vista necessariamente diversi. Naturalmente, poiché entrambe le discipline non sono entità astratte e utilizzano tutte e due strumenti spesso diversi tra loro, è necessario investire sulla formazione e sulla conoscenza anche di questi strumenti. In altre parole al fine di poter leggere nello stesso modo prove e risultati è fondamentale creare un nuovo linguaggio comune preciso e puntuale.

Bibliografia

- Bernat, J. L. (2006). Chronic disorders of consciousness. *Lancet*, 367(9517), 1181-1192.
- Brembs, B. (2011). Towards a scientific concept of free will as a biological trait: spontaneous actions and decision-making in invertebrates. *Proc Biol Sci*, 278(1707), 930-939.
- Bruno, M. A., Vanhaudenhuyse, A., Thibaut, A., Moonen, G., & Laureys, S. (2011). From unresponsive wakefulness to minimally conscious PLUS and functional locked-in syndromes: recent advances in our understanding of disorders of consciousness. *J Neurol*, 258(7), 1373-1384.
- Cameron, C. D., Brown-Iannuzzi, J. L., & Payne, B. K. (2012). Sequential Priming Measures of Implicit Social Cognition: A Meta-Analysis of Associations With Behavior and Explicit Attitudes. *Pers Soc Psychol Rev*.
- Cashmore, A. R. (2010). The Lucretian swerve: the biological basis of human behavior and the criminal justice system. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 107(10), 4499-4504.
- Catani, M. (2006). Diffusion tensor magnetic resonance imaging tractography in cognitive disorders. *Curr Opin Neurol*, 19(6), 599-606.

- Chase, T.N. (2011). Apathy in neuropsychiatric disease: diagnosis, pathophysiology, and treatment. *Neurotox Res*, 19(2), 266-278.
- Curtis, C. E., Cole, M. W., Rao, V.Y., & D'Esposito, M. (2005). Canceling planned action: an fMRI study of countermanding saccades. *Cereb Cortex*, 15(9), 1281-1289.
- Damasio, A. (2005). *L'errore di Cartesio. Emozione, ragione e cervello umano. VIII Edizione*. Milano: Adelphi.
- De Graaf, T.A., Hsieh, P.J., & Sack, A.T. (2012). The 'correlates' in neural correlates of consciousness. *Neurosci Biobehav Rev*, 36(1), 191-197.
- Gawryluk, J. R., D'arcy, R. C., Connolly, J. F., & Weaver, D. F. (2010). Improving the clinical assessment of consciousness with advances in electrophysiological and neuroimaging techniques. *BMC Neurol*, 10, 11.
- Giacino, J.T., Kalmar, K., & Whyte, J. (2004). The JFK Coma Recovery Scale-Revised: measurement characteristics and diagnostic utility. *Arch Phys Med Rehabil*, 85(12), 2020-2029.
- Gleichgerrcht, E., Ibanez, A., Roca, M., Torralva, T., & Manes, F. (2010). Decision-making cognition in neurodegenerative diseases. *Nat Rev Neurol*, 6(11), 611-623.
- Goldstein, A. M., Morse, S.J., & Shapiro, D.L. (2003). *Evaluation of Criminal Responsibility: Handbook of Psychology*.
- Horwitz, B. (2003). The elusive concept of brain connectivity. *Neuroimage*, 19(2 Pt 1), 466-470.
- Hwang, K., Velanova, K., & Luna, B. (2010). Strengthening of top-down frontal cognitive control networks underlying the development of inhibitory control: a functional magnetic resonance imaging effective connectivity study. *J Neurosci*, 30(46), 15535-15545.
- Jefferson, M. (2007). *Criminal Law 8th Revised Edition*. Harlow: Longman, Foundation Studies in Law Series.
- Kiehl, K. A. (2006). A cognitive neuroscience perspective on psychopathy: evidence for paralimbic system dysfunction. *Psychiatry Res*, 142(2-3), 107-128.
- Laureys, S., Perrin, F., Schnakers, C., Boly, M., & Majerus, S. (2005). Residual cognitive function in comatose, vegetative and minimally conscious states. *Curr Opin Neurol*, 18(6), 726-733.
- Levy, D. E., Sidtis, J.J., Rottenberg, D.A., Jarden, J. O., Strother, S. C., Dhawan, V., Plum, F. (1987). Differences in cerebral blood flow and glucose utilization in vegetative versus locked-in patients. *Ann Neurol*, 22(6), 673-682.
- Lucantonio, F., Stalnaker, T.A., Shaham, Y., Niv, Y., & Schoenbaum, G. (2012). The impact of orbitofrontal dysfunction on cocaine addiction. *Nat Neurosci*, 15(3), 358-366.
- Luna, B., Garver, K. E., Urban, T.A., Lazar, N.A., & Sweeney, J.A. (2004). Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. *Child Dev*, 75(5), 1357-1372.
- Luna, B., Padmanabhan, A., & O'hearn, K. (2010). What has fMRI told us about the development of cognitive control through adolescence? *Brain Cogn*, 72(1), 101-113.
- Luna, B., Thulborn, K. R., Munoz, D. P., Merriam, E. P., Garver, K. E., Minshew, N. J., Sweeney, J. A. (2001). Maturation of widely distributed brain function subserves cognitive development. *Neuroimage*, 13(5), 786-793.
- Macmillan, M. (1992). Inhibition and the control of behavior. From Gall to Freud via Phineas Gage and the frontal lobes. *Brain Cogn*, 19(1), 72-104.
- Morse, S. J. (2004). New neuroscience, old problems: legal implications of brain science. *Cerebrum*, 6(4), 81-90.
- Nucifora, P. G., Verma, R., Lee, S. K., & Melhem, E. R. (2007). Diffusion-tensor MR imaging and tractography: exploring brain microstructure and connectivity. *Radiology*, 245(2), 367-384.
- Ogawa, S., Menon, R. S., Kim, S. G., & Ugurbil, K. (1998). On the characteristics of functional magnetic resonance imaging of the brain. *Annu Rev Biophys Biomol Struct*, 27, 447-474.
- Owen, A. M., Coleman, M. R., Menon, D. K., Berry, E. L., Johnsrude, I. S., Rodd, J. M., Pickard, J. D. (2005). Using a hierar-

- chical approach to investigate residual auditory cognition in persistent vegetative state. *Prog Brain Res*, 150, 457-471.
- Owen, A. M., Menon, D. K., Johnsrude, I. S., Bor, D., Scott, S. K., Manly, T., Pickard, J. D. (2002). Detecting residual cognitive function in persistent vegetative state. *Neurocase*, 8(5), 394-403.
- Roskies, A. L. (2010). How does neuroscience affect our conception of volition? *Annu Rev Neurosci*, 33, 109-130.
- Rubia, K., Smith, A. B., Brammer, M. J., & Taylor, E. (2003). Right inferior prefrontal cortex mediates response inhibition while mesial prefrontal cortex is responsible for error detection. *Neuroimage*, 20(1), 351-358.
- Sabatini, F., & Coletti, V. (2005). *NUOVO DIZIONARIO della lingua ITALIANA*. Milano: Rizzoli & Larousse.
- Soon, C. S., Brass, M., Heinze, H. J., & Haynes, J. D. (2008). Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nat Neurosci*, 11(5), 543-545.
- Stalnaker, T. A., Roesch, M. R., Calu, D. J., Burke, K. A., Singh, T., & Schoenbaum, G. (2007). Neural correlates of inflexible behavior in the orbitofrontal-amygdalar circuit after cocaine exposure. *Ann NY Acad Sci*, 1121, 598-609.
- Stephan, K. E., Harrison, L. M., Penny, W. D., & Friston, K. J. (2004). Biophysical models of fMRI responses. *Curr Opin Neurobiol*, 14(5), 629-635.
- Teasdale, G., & Jennett, B. (1974). Assessment of coma and impaired consciousness. A practical scale. *Lancet*, 2(7872), 81-84.
- Velanova, K., Wheeler, M. E., & Luna, B. (2009). The maturation of task set-related activation supports late developmental improvements in inhibitory control. *J Neurosci*, 29(40), 12558-12567.