

LO STUDIO NEUROSCIENTIFICO DEL PENSIERO CREATIVO: RISULTATI E METODI DI STUDIO NELL'INDAGINE DEL PENSIERO DIVERGENTE

SERENA MASTRIA^{1,2}, SERGIO AGNOLI³
E GIOVANNI EMANUELE CORAZZA^{1,2}

¹ *Università di Bologna*, ² *Marconi Institute for Creativity, Sasso Marconi, Italy*,

³ *Università di Trieste*

Riassunto. La creatività è una delle abilità cognitive che differenzia più significativamente gli esseri umani dalle altre specie animali. Il pensiero creativo, per la sua intrinseca complessità, è stato da sempre considerato un fenomeno elusivo, difficile da indagare in modo rigoroso. Negli ultimi anni, tuttavia, lo studio del pensiero creativo sta rapidamente avanzando grazie a importanti sviluppi metodologici legati ad innovativi strumenti di valutazione e analisi del comportamento creativo associati all'impiego di metodiche che permettono di rilevare e riprodurre graficamente l'attività cerebrale. Il presente lavoro si propone di fornire una panoramica delle recenti evidenze empiriche sulla creatività nell'ambito della ricerca neuroscientifica, focalizzandosi in particolare su una delle caratteristiche principali del pensiero creativo e cioè sulla abilità divergente di produrre idee potenzialmente originali ed efficaci a problemi che non prevedono un'unica soluzione corretta. Nello specifico vengono presi in considerazione i principali risultati e metodi di studio emersi nella ricerca neuroscientifica del pensiero divergente con l'utilizzo della elettroencefalografia (EEG) e della risonanza magnetica funzionale (fMRI). Il presente lavoro analizza dunque il significato funzionale delle dinamiche temporali e l'organizzazione delle strutture cerebrali associate al pensiero divergente, mettendo in luce come il pensiero divergente può essere rigorosamente esaminato da un punto di vista neuroscientifico attraverso l'uso di diverse metodiche. Nelle conclusioni sono discusse le implicazioni e proposte possibili linee di ricerca future.

1. INTRODUZIONE

La creatività è un'abilità cognitiva complessa, multidimensionale, che distingue tangibilmente la specie umana dalle altre. Essere creativo è indispensabile per fronteggiare le innumerevoli sfide quotidiane, per la nostra sopravvivenza (Simonton, 2008), per la nostra dignità (Corazza, 2016), per la nostra struttura di identità (Kaufman e Sternberg, 2006; Lubart, 2018; Silvia e Phillips, 2004). Basti pensare all'importanza che il pensiero creativo riveste nel dominio artistico, scientifico, educativo o aziendale. La creatività è stata, infatti, identificata come il motore per la generazione e il progresso della conoscenza e della cultura della specie umana (Sternberg e Lubart, 1995). Lo studio della creatività ha una lunga tradizione, a partire dagli studi di fine '800 di Galton sull'eredità della genialità tra generazioni (Galton, 1869). La nascita dello studio scientifico del pensiero creativo

viene però rintracciata nel discorso di Guilford tenuto nel 1950, presidente neo-eletto dell'American Psychological Association (Guilford, 1950), che chiamava alla necessità dello studio scientifico della creatività, attraverso metodi e linee di ricerche dedicate. Grazie alla spinta di ricercatori di eccezione come Guilford, Torrance, Sternberg o Simonon le scienze psicologiche hanno prodotto teorie, metodi, paradigmi e risultati fondamentali per la conoscenza del pensiero creativo. Diverse prospettive teoriche definiscono la creatività come il risultato di una complessa interazione tra individuo e ambiente (Corazza e Lubart, 2020; Csikszentmihalyi, 1988; Lubart, 1999; Mumford e Gustafson, 1988), rivelando l'importanza dei fattori cognitivi, sociali e culturali nello studio della creatività (Amabile, 1983, 1996; Glăveanu *et al.*, 2020). In particolare, molti studi hanno approfondito lo studio delle dimensioni della personalità, dei contesti applicativi, degli elementi cognitivi e motivazionali alla base del pensiero creativo (es. Davis, 2009; Dietrich e Kanso, 2010; Fink e Benedek, 2014; Silvia, Wigert, Reiter-Palmon e Kaufman, 2012). Il numero di lavori scientifici sulla creatività, che includono il termine «creatività» o «creativo» come parola chiave o parte di una parola chiave, identificabili tramite *Web of Science* (WoS) nel periodo 2000-2018, è cresciuto considerevolmente in tutte le regioni del mondo e in particolare in Europa, dove emerge il numero più elevato di contributi (Corazza e de Saint-Laurent, 2020). La comunità scientifica della psicologia è la più rilevante ma non la sola, in quanto fornisce circa il 20% dei contributi complessivi, a testimonianza della interdisciplinarietà di questo costrutto. L'interesse internazionale per la creatività è anche testimoniato dalla nascita di iniziative come l'*International Society for the Study of Creativity and Innovation* (ISSCI, <https://issci.online>), un'organizzazione scientifica fondata da eminenti ricercatori nell'ambito della creatività diretta a favorire studi internazionali e interdisciplinari sulla creatività. Gli ultimi decenni hanno visto inoltre un nuovo e crescente interesse per il pensiero creativo sotto la spinta di discipline neuroscientifiche, specificatamente legato all'indagine delle dinamiche e strutture neurali alla base della cognizione creativa o *creative cognition*, cioè dei processi cognitivi coinvolti nel pensiero creativo (es. Arden, Chavez, Grazioplene e Jung, 2010; Dietrich e Kanso, 2010; Fink e Benedek, 2014; Sawyer, 2011). L'organizzazione di conferenze internazionali sull'argomento come la *Society for the Neuroscience of Creativity* (SfNC) o la *Marconi Institute for Creativity (MIC) Conference*, avvalorano il crescente interesse verso la creatività.

Per comprendere il fenomeno di studio delle neuroscienze cognitive dedicate allo studio del pensiero creativo è tuttavia bene partire dalla sua definizione. Cos'è un'idea creativa? Per riconoscere come creativa un'idea, devono essere soddisfatti due requisiti fondamentali:

l'idea deve essere caratterizzata da potenziale originalità e da potenziale efficacia (Amabile, 1983; Corazza, 2016; Runco, 2004; Runco e Jaeger, 2012; Sternberg e Lubart, 1999). Abbracciando la definizione classica di creatività (Stein, 1953; Runco e Jaeger, 2012), originalità ed efficacia sono i due parametri che identificano un prodotto come creativo, tanto che la loro valutazione come requisiti distinti o concomitanti è alla base dell'operazionalizzazione della creatività in termini sperimentali. Per originalità si intende un prodotto caratterizzato da *a)* novità: qualsiasi risposta insolita o rara è nuova per definizione; *b)* sorpresa: idee inaspettate o impensabili generano sorpresa; *c)* autenticità: le idee creative sono spesso genuine, contenenti elementi che appartengono al produttore (Corazza, 2016). Sebbene l'originalità sia vitale per la creatività, questa è un requisito necessario ma non sufficiente. Le idee originali devono infatti essere anche efficaci per essere considerate creative. Sebbene l'operazionalizzazione di efficacia sia decisamente complessa (si veda Benedek *et al.*, 2016), per efficacia si intende un prodotto caratterizzato da plausibilità, utilità e appropriatezza. Si consideri come esempio due possibili risposte alla richiesta «Trova usi creativi per uno pneumatico da auto»: *i)* «lo utilizzo come vaso da fiori sospeso»; *ii)* «lo utilizzo come cacciavite». Sebbene entrambe le risposte siano non comuni, la seconda è considerata meno appropriata e quindi meno creativa. A partire dall'indagine di questi due requisiti, sono stati sviluppati diversi filoni di ricerca nelle neuroscienze cognitive dedicate allo studio del pensiero creativo, accumulati da una idea di carattere generale: come emerge un'idea creativa e che cosa accade nel cervello quando un individuo ha un'idea creativa? Questa domanda di ricerca è stata negli ultimi anni ampiamente affrontata dalle neuroscienze cognitive. È bene chiarire che, in termini generali, il pensiero creativo in ambito neuroscientifico è stato inquadrato all'interno della comune cognizione umana ed è considerato come un'abilità mentale complessa che emerge dall'interazione dinamica di funzioni cognitive di base diverse e ben distinguibili, come l'attenzione, la memoria o il controllo cognitivo (si veda ad esempio Benedek e Fink, 2019). I ricercatori che abbracciano l'approccio della cognizione creativa sembrano essere concordi nel vedere l'atto creativo come strettamente legato al pensiero divergente. Nonostante l'intrinseca complessità del pensiero creativo, le neuroscienze hanno trovato nel pensiero divergente un'operazionalizzazione in grado di catturare gli aspetti dinamici alla base dell'emergere di un'idea originale ed efficace.

Il pensiero divergente è dunque definibile come un comportamento esplorativo che porta alla generazione di idee potenzialmente originali ed efficaci a problemi aperti (Corazza, 2016; Guilford, 1950; 1967; Lubart, Zenasni e Barbot, 2013; Runco *et al.*, 1999; Runco e

Jaeger, 2012). L'idea che il pensiero divergente sottenda un meccanismo esplorativo è rintracciabile nel contributo offerto da Donald T. Campbell (1960) che, abbracciando una prospettiva evoluzionistica, ha sviluppato un modello del pensiero creativo caratterizzato da: 1) un meccanismo per introdurre variazione, 2) un processo di selezione coerente, e 3) un meccanismo per preservare e riprodurre le variazioni selezionate. Riprendendo questo modello, Simonton (2003) afferma che il processo creativo prenderebbe avvio da una modificazione casuale di rappresentazioni mentali che, tramite una combinazione definita, produce nuovi pensieri e soluzioni. Tanto più grande è il numero di rappresentazioni mentali, tanto maggiori saranno le possibili combinazioni tra essi e di conseguenza il potenziale creativo di un individuo. È importante sottolineare che il modello evoluzionistico darwiniano applicato alla generazione di idee è stato in seguito criticato (si veda Gabora, 2005) e dovrebbe essere considerato come un possibile approccio di modellazione al pensiero creativo.

La modalità di pensiero divergente è caratterizzata da una componente generativa, che consentirebbe la produzione di idee originali, ed una valutativa, di stima del valore delle stesse (Kaufman, Plucker e Baer, 2008). Tale visione è in linea con una recente teoria relativa alla cognizione creativa (Ball e Christensen, 2020) secondo la quale i meccanismi cognitivi alla base del pensiero creativo includono sia 1) processi spontanei e veloci che 2) processi deliberati e lenti. I processi spontanei e veloci sono autonomi e indipendenti dalla *working memory* (WM), coinvolgono ad esempio le informazioni di recupero, elaborazione associativa e ristrutturazione delle informazioni, che danno origine a intuizioni creative. I processi deliberati e lenti sono invece controllati e dipendenti dalla WM e coinvolgono, ad esempio, l'esplorazione analitica di idee iniziali e la loro elaborazione, valutazione e selezione/rifiuto. L'esplorazione analitica delle idee pone elevate esigenze alle funzioni esecutive per la continua elaborazione e manipolazione delle informazioni e anche per l'inibizione delle informazioni ritenute non rilevanti.

È bene sottolineare che la modalità divergente è solamente una delle modalità generative all'interno del processo di pensiero creativo. Mentre la modalità divergente è caratterizzata da un comportamento esplorativo in grado di generare molteplici idee alternative, la componente convergente è caratterizzata dalla generazione dell'unica idea o soluzione esatta a un problema chiuso (Guilford, 1950, 1967; Wallas, 1926). Il fenomeno dell'*insight* (o *Eureka moment* oppure *AHA moment!*, es. Dominowski e Dallob, 1995; Mayer, 1995) è una caratterizzazione tipica del pensiero convergente ed ha ricevuto molteplice interesse anche da parte delle neuroscienze (es. Kounios *et al.*, 2008; Sandkühler e Bhattacharya, 2008). Tuttavia, mentre il pensiero

convergente è caratterizzato da una improvvisa ristrutturazione della struttura di conoscenza identificabile nella presa di coscienza istantanea del raggiungimento dell'idea o soluzione corretta, il pensiero divergente si caratterizza per un processo generativo dinamico senza apparente soluzione, che in gran parte rispecchia il processo generativo caratteristico dell'espressione del potenziale creativo dell'essere umano (Runco e Acar, 2012). Il presente lavoro perciò è dedicato alla ricerca neuroscientifica che si è indirizzata allo studio del pensiero divergente in qualità di componente maggiormente rappresentativa del potenziale creativo dell'essere umano, con particolare riferimento alla fase generativa. Il lavoro tenta dunque di sintetizzare l'attuale crescente ricerca neuroscientifica su questo argomento, esaminando i risultati più recenti degli studi che hanno indagato i correlati neurali associati al processo di generazione di idee attraverso in particolare l'utilizzo di tecnologie di neuroimmagine, come l'Elettroencefalografia (EEG) e la Risonanza magnetica funzionale (fMRI).

2. IL PENSIERO DIVERGENTE E LE NEUROSCIENZE

Lo studio del pensiero divergente, e in particolare della generazione di idee creative, ha una lunga tradizione nella ricerca cognitiva e, solo più recentemente, è stata indagata dalle neuroscienze cognitive. Un tipico compito che stimola la capacità di generare idee utilizzando una modalità divergente, e che è ampiamente utilizzato dalla letteratura neuroscientifica, è l'*Alternative Uses (AU) Task* (letteralmente, «compito degli usi alternativi»; Guilford, 1950, 1967), il quale richiede ai partecipanti di generare usi alternativi per oggetti quotidiani (per esempio «come potresti usare una bottiglia?»), stimolandoli, secondo la più comune declinazione delle istruzioni sperimentali, ad essere originali (Forthmann *et al.*, 2016; Harrington, 1975). La prestazione creativa in questo genere di compiti divergenti è nella maggior parte degli studi neuroscientifici quantificata in termini di qualità di idee prodotte (originalità), comunemente stimata a posteriori da parte di valutatori esperti (Reiter-Palmon, Forthmann e Barbot, 2019). Tali studi utilizzano versioni modificate del classico compito degli usi alternativi, il quale, nell'ambito della ricerca psicometrica sul potenziale creativo, richiede un compito generativo della durata di diversi minuti (es. Kaufman *et al.*, 2008). Diversamente, nella ricerca neuroscientifica, per le peculiarità tipiche della misurazione neurofisiologica che necessita di un segnale privo di rumore e di una dimensione temporale molto controllata (condizioni che spesso si ottengono tramite compiti relativamente rapidi), come illustrato in figura 1, ai partecipanti è richiesto di generare idee creative in tempi

Alternative Uses (AU) task

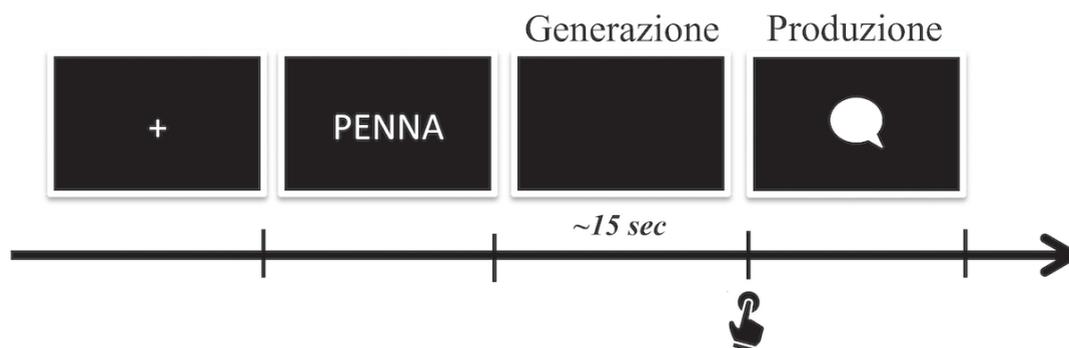


FIG. 1. Illustrazione di un esempio del compito degli usi alternativi (AU task) utilizzato in ambito neuroscientifico.

piuttosto brevi (in circa 10-20 secondi). Inoltre viene spesso richiesto di premere un tasto prima di produrre l'idea, tenendo così distinto l'intervallo temporale associato all'ideazione creativa da quello legato alla produzione dell'idea (es. Agnoli, Zanon, Mastria, Avenanti e Corazza, 2020; Beaty, Benedek, Kaufman e Silvia, 2015; Benedek, Bergner, Könen, Fink e Neubauer, 2011; Benedek, Schickel, Jauk, Fink e Neubauer, 2014; Fink, Benedek, Grabner, Staudt e Neubauer, 2007; Fink *et al.*, 2009a).

Il controllo del decorso temporale del pensiero divergente ha reso così possibile l'identificazione delle risposte cerebrali specificamente associate alla generazione di ciascuna idea e la conseguente esclusione di potenziali artefatti motori causati dalla produzione della risposta (Abraham *et al.*, 2012). Grazie a sviluppi metodologici e di analisi della prestazione creativa, l'indagine neuroscientifica sulla creatività ha fatto negli ultimi anni numerosi passi avanti, dimostrando l'esistenza di specifici *pattern* di attivazione cerebrale che riflettono il coinvolgimento di meccanismi e processi cognitivi di base specificamente associati alla fase di generazione di idee durante il pensiero divergente (es. Fink e Benedek, 2014; Gonen-Yaacovi *et al.*, 2013; Sawyer, 2011). I paragrafi successivi ne illustrano i dettagli.

2.1. Ricerca EEG sulla generazione di idee creative

La ricerca neuroscientifica dedicata allo studio del pensiero divergente ha fino ad ora prevalentemente sfruttato l'alta risoluzione temporale dell'EEG per esaminare il significato funzionale delle dinamiche cerebrali associate al processo generativo (o ideativo) in funzione del livello di originalità delle idee prodotte. Un risultato robusto e ampiamente replicato riguarda l'aumento della potenza alfa nel *range*

di frequenza da 8 a 12 Hz durante il pensiero divergente che rifletterebbe un meccanismo attentivo maggiormente orientato internamente, in assenza di stimolazione esterna *bottom-up* e, pertanto, una forma di attività *top-down* (si veda Fink e Benedek, 2014 per una rassegna esaustiva sull'argomento). Le variazioni di potenza alfa sono tipicamente calcolate in termini di *Task-Related Power* (TRP; letteralmente, «potenza evento-relata»; Benedek *et al.*, 2011, 2014; si veda anche Pfurtscheller e Da Silva, 1999) sottraendo l'attività alfa durante l'ideazione creativa da quella misurata durante un periodo di inattività o *reference* (es. Fink *et al.*, 2007; Jauk, Benedek e Neubauer, 2012). I valori positivi rifletterebbero così sincronizzazione (*Event-Related Synchronization*; ERS) alfa, mentre i valori negativi desincronizzazione (*Event-Related Desynchronization*; ERD) alfa. Martindale e Hasenpus (1978) sono stati tra i primi a dimostrare che la generazione di storie creative evocava maggiore potenza alfa rispetto all'esecuzione di compiti meno creativi e che individui altamente creativi esibivano maggiore sincronizzazione alfa rispetto a individui meno creativi (Martindale e Mines, 1975). Questi risultati sono stati in seguito replicati più volte rafforzando il ruolo funzionale dell'attività alfa durante diversi compiti creativi che stimolavano il pensiero divergente, in contrapposizione a quello convergente in cui gli individui convergono sull'unica risposta accettabile a un dato problema (Benedek *et al.*, 2011; Fink *et al.*, 2007; Jauk *et al.*, 2012). Durante il compito degli usi alternativi, la sincronizzazione alfa è stata, infatti, più volte identificata in associazione alla produzione di idee caratterizzate da alti livelli di originalità, rispetto a quelle scarsamente originali (Benedek *et al.*, 2014; Fink e Neubauer, 2006; Grabner, Fink e Neubauer A.C., 2007) e nei partecipanti altamente creativi, rispetto a quelli meno creativi (Fink *et al.*, 2009a; Fink *et al.*, 2009b). Da un punto di vista topografico, la modulazione dell'attività alfa durante il pensiero divergente è stata specificatamente osservata a livello delle regioni corticali frontali e parietali posteriori (es. Fink e Benedek, 2014). L'aumento di potenza alfa a livello della corteccia frontale durante l'ideazione creativa si pensa possa riflettere un coinvolgimento delle funzioni esecutive come l'inibizione di risposte prevalenti, comuni o non originali provenienti dalla memoria, che faciliterebbe il raggiungimento di risposte meno comuni e più originali (Fink e Neubauer, 2006; Wang, Hao, Ku, Grabner e Fink, 2017; si veda anche Hanslmayr, Gross, Klimesch e Shapiro, 2011; Jensen e Mazaheri, 2010; Klimesch, Sauseng e Hanslmayr, 2007). La sincronizzazione alfa parietale posteriore, con un coinvolgimento particolare dell'emisfero destro, invece, sembrerebbe riflettere un meccanismo di controllo attentivo *top-down* diretto verso l'interno, il quale proteggerebbe dall'interferenza di stimoli esterni e favorirebbe una ricombinazione funzionale di concetti semantica-

mente non collegati per produrre un'idea realmente originale (Abraham, 2016; Agnoli, Franchin, Rubaltelli e Corazza, 2018; Benedek *et al.*, 2011, 2014, 2016; Fink *et al.*, 2007, 2009a; Klimesch, 2012).

Alcuni recenti lavori hanno approfondito lo studio delle dinamiche cerebrali specificatamente associate al decorso temporale dell'ideazione creativa. È interessante notare che, durante la prestazione del noto compito di generazione di usi alternativi per oggetti quotidiani, il numero di idee alternative prodotte dai partecipanti tipicamente diminuisce col passare del tempo, mentre l'originalità delle idee tende ad aumentare, un fenomeno noto come *serial order effect* (Christensen, Guilford e Wilson, 1957; Johns, Morse e Morse, 2001; Milgram e Rabkin, 1980; Phillips e Torrance, 1977). In altre parole, durante il decorso temporale del processo esplorativo d'ideazione, gli individui tendono a sopprimere progressivamente l'interferenza dovuta all'emergere spontaneo di idee comuni o non originali, e continuare ad esplorare alternative meno comuni fino al raggiungimento di idee realmente originali (Benedek *et al.*, 2014; Kraus, Cadle e Simon-Dack, 2019; Wang *et al.*, 2017). Alcuni interessanti lavori EEG hanno approfondito proprio questo meccanismo esplorativo alla base del processo ideativo, identificando specifici *pattern* di attività oscillatoria cerebrale durante il decorso temporale del pensiero divergente (Agnoli *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2017; Kraus *et al.*, 2019) e in particolare durante l'emergere dell'originalità (Agnoli *et al.*, 2020). Risultati interessanti provengono da un recente lavoro di Agnoli e collaboratori (2020), i quali hanno mostrato che il decorso temporale del processo ideativo si caratterizza da uno specifico *pattern* di modulazione alfa, che cambia in funzione del tempo e delle regioni corticali coinvolte. In particolare, l'attività alfa desincronizza durante la fase iniziale del processo ideativo (durante la produzione di idee comuni o non originali), mentre sincronizza durante la fase più tardiva (durante la produzione di idee originali). Gli Autori hanno anche dimostrato che la sincronizzazione alfa era in grado di predire l'originalità delle idee, con un valore predittivo maggiore dell'attività alfa nelle aree corticali frontali durante la fase iniziale del processo ideativo e un contributo di costante importanza delle aree corticali parietali posteriori durante l'intero processo. Gli Autori hanno interpretato questo *pattern* di risultati come evidenza che la produzione spontanea di idee comuni o non originali è prevalentemente associata al recupero di informazioni provenienti dalla memoria a lungo termine (Klimesch *et al.*, 2007; Hanslmayer *et al.*, 2011), fenomeno riscontrabile prevalentemente all'inizio del processo di generazione di tipo divergente. La consecutiva generazione di idee originali, invece, recluta meccanismi esecutivi di tipo *top-down*, come l'inibizione di associazioni semantiche prevalenti (Luft, Zioga, Thompson, Banissy e Bhattacharya, 2018) che con-

sentirebbe una ricombinazione efficace di concetti semanticamente distanti (Benedek *et al.*, 2011; Fink *et al.*, 2007, 2009a; Rominger *et al.*, 2019).

Altri interessanti risultati derivanti dalla ricerca EEG pongono l'accento su come la generazione di idee non sia da considerarsi una fase isolata nel processo creativo, ma sembri invece operare dinamicamente in azione congiunta con altre componenti, come la fase di valutazione delle idee. Hao e collaboratori (2016), per esempio, hanno dimostrato che la reiterazione tra la fase di generazione e quella di valutazione delle idee facilita lo sviluppo di idee creative. Gli Autori hanno in particolare dimostrato che la generazione di idee richiesta ai partecipanti dopo una fase di valutazione delle stesse era associata ad un aumento di potenza alfa specialmente nelle regioni frontali. Questi risultati sembrano dimostrare l'esistenza di un'interazione dinamica tra diverse componenti del processo creativo di tipo divergente e, in particolare, che la valutazione di idee potrebbe influenzare la fase di generazione, aumentando l'elaborazione attentiva interna in successive fasi generative, inibendo di conseguenza il recupero di informazioni comuni o non originali (Hao *et al.*, 2016). Questo risultato sembrerebbe essere in linea con le potenzialità offerte dagli algoritmi che possono simulare l'evoluzione di un'idea per risolvere un determinato problema attraverso un certo numero di fasi (Johnson-Laird, 2006; si veda anche Mekern, Hommel e Sjoerds, 2019 per un'analisi dei modelli computazionali del pensiero creativo). Nella prima fase, i concetti esistenti vengono mescolati a caso per generare nuove idee attraverso vincoli basati sulla conoscenza e l'esperienza. Questa fase è applicata fino a quando emerge qualcosa di utile, la soluzione ottimale per quel dato problema. Nella seconda fase sono invece utilizzati dei vincoli per valutare i risultati della fase precedente e per apportarvi eventuali modifiche. I risultati che ne derivano possono riportare alla fase generativa per nuovi affinamenti.

In sintesi, i risultati sopra descritti suggeriscono l'esistenza di una robusta relazione tra l'attività oscillatoria alfa, osservabile soprattutto a livello delle aree corticali frontali, parietali e, sebbene con minori evidenze, temporali (Luft *et al.*, 2018) posteriori (di destra) e l'ideazione creativa. Inoltre, quest'attività oscillatoria sembra variare in funzione sia del decorso temporale dell'ideazione creativa che delle specifiche fasi di elaborazione del pensiero divergente (generativa *vs.* valutativa), riflettendo il coinvolgimento di diverse funzioni cognitive di base.

Ma qual è esattamente il significato funzionale della modulazione alfa durante la generazione di idee originali? Le prime interpretazioni vedevano l'attività alfa come un indicatore di ridotta elaborazione dell'informazione o «deattivazione corticale» (es. Pfurtscheller, Stan-

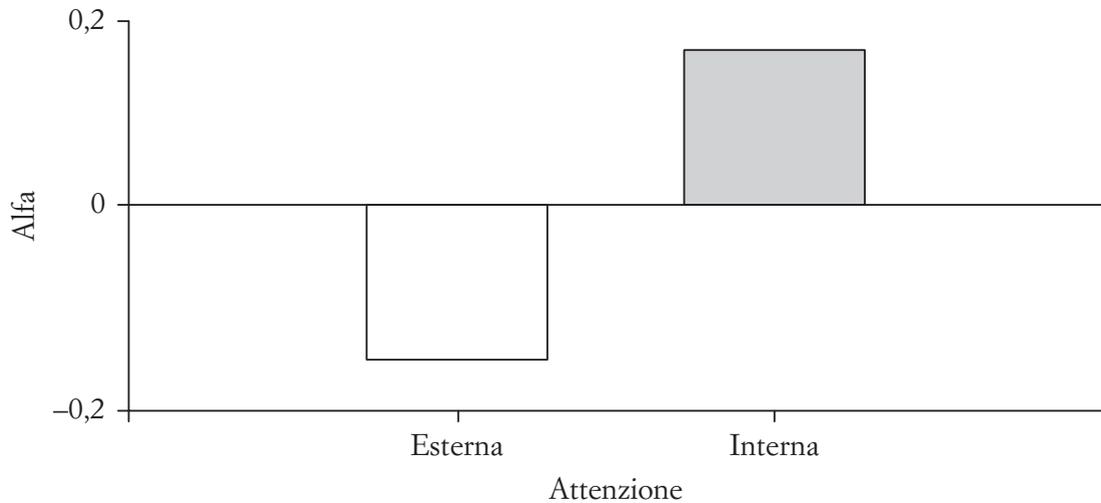


FIG. 2. Rappresentazione schematica della modulazione dell'attività oscillatoria alfa durante il pensiero divergente. La potenza alfa nel range di frequenza da 8 a 12 Hz durante il pensiero divergente sincronizza se l'attenzione è diretta verso l'interno (attenzione interna), mentre desincronizza se l'attenzione è diretta verso l'esterno (attenzione esterna). La sincronizzazione sembrerebbe inoltre aumentare in funzione dell'originalità delle risposte prodotte.

cak e Neuper, 1996). La relazione alfa-creatività è stata, infatti, originariamente associata a uno stato di bassa attivazione corticale (es. Martindale, 1999), o «ipofrontalità» (es. Dietrich, 2003). Questa interpretazione è stata in seguito rivista poiché diverse evidenze sperimentali hanno dimostrato che l'attività alfa sembrava invece riflettere uno stato di elaborazione attiva dell'informazione (es. Palva e Palva, 2007). Il processo di generazione di idee creative richiede, infatti, processi immaginativi più che elaborazione di stimoli esterni (Abraham, 2016). La sincronizzazione alfa durante l'ideazione creativa sembrerebbe dunque riflettere un meccanismo neuronale di protezione dall'interferenza ambientale esterna potenzialmente distraente e pertanto di attenzione diretta internamente rispetto che esternamente (Benedek, 2018; Fink e Benedek, 2014). A sostegno di questa interpretazione, in un interessante studio EEG è stato dimostrato che l'esecuzione di compiti che richiedevano di focalizzarsi sull'elaborazione interna dell'informazione (attenzione interna), in modo indipendente quindi dall'informazione sensoriale proveniente dall'ambiente esterno, evocava maggiore potenza alfa nelle regioni tipicamente coinvolte nel pensiero creativo (le aree parietali posteriori dell'emisfero destro), rispetto a compiti che richiedevano una elaborazione dell'informazione dipendente dall'ambiente esterno (attenzione esterna; Benedek *et al.*, 2011; si veda anche Benedek *et al.*, 2014 e Ceh *et al.*, 2020). Nell'insieme, la replica costante all'interno di una molteplicità di studi di questo effetto associato al pensiero divergente dimostra chiaramente che la sincronizzazione alfa durante l'ideazione creativa è uno dei ri-

sultati più consistenti presenti nella letteratura neuroscientifica sulla creatività e sembra riflettere stati mentali caratterizzati da un *focus* attentivo diretto verso l'interno o una forma di controllo *top-down* indipendente da stimolazione esterna *bottom-up* (si veda la fig. 2).

Diversi lavori hanno inoltre associato questa modulazione dell'attività alfa di origine attentiva a meccanismi di ri-combinazione dell'informazione interna al fine di generare contenuti dotati di originalità (es. Agnoli *et al.*, 2020; Fink e Benedek, 2014; Schwab, Benedek, Papousek, Weiss e Fink, 2014). Di fatto la ricerca sul pensiero divergente ha evidenziato non solo la natura attentiva del fenomeno, ma anche la sua connessione con meccanismi di elaborazione attiva dell'informazione interna guidati dalla ricerca dell'originalità della risposta.

2.2. Ricerca fMRI sulla generazione di idee creative

Oltre alla ricerca EEG, l'attivazione cerebrale associata al pensiero creativo è stata ampiamente indagata attraverso la risonanza magnetica funzionale. L'fMRI, grazie alla sua alta risoluzione spaziale, è particolarmente utile per identificare le aree cerebrali, corticali e sottocorticali, coinvolte nei diversi processi cognitivi attraverso la misurazione dei cambiamenti emodinamici del cervello. Nel loro complesso, gli studi fMRI suggeriscono che la manifestazione di specifici *pattern* cerebrali durante compiti creativi di tipo divergente è strettamente associata al tipo di processo e meccanismo coinvolti durante l'ideazione, come ad esempio la memoria, l'attenzione o il controllo cognitivo (Beaty *et al.*, 2015). Uno dei primi tentativi di indagine in questa direzione proviene dal gruppo di ricerca di Fink e collaboratori (2009a), i quali hanno confrontato la risposta cerebrale durante il classico compito degli usi alternativi con quella associata a compiti non creativi (di controllo). I risultati hanno mostrato che la generazione di idee creative evocava l'attivazione cerebrale del giro inferiore frontale sinistro e delle regioni parietali e occipitali dell'emisfero sinistro. Questa prima osservazione è stata in seguito corroborata da una serie di altri studi che hanno indagato il ruolo delle regioni cerebrali anteriori frontali e posteriori occipito-parietali coinvolte nel processo di generazione di idee creative, chiarendone il loro significato funzionale (Chrysikou e Thompson-Schill, 2011; Fink *et al.*, 2014; Kleibecker, Koolschijn, Jolles, De Dreu e Crone, 2013; Chen *et al.*, 2015). Per esempio, il ruolo funzionale delle regioni cerebrali parietali posteriori nel pensiero divergente, indagato nel lavoro di Benedek e collaboratori (2014) attraverso la manipolazione della direzione dell'attenzione dei partecipanti, sembra coerente con i risultati fMRI del lavoro

di Chen e collaboratori (2015): gli Autori dimostrano che l'abilità creativa è positivamente associata al volume corticale del lobo parietale destro e in particolare del precuneo, che è tipicamente coinvolto nelle funzioni esecutive e nella memoria di lavoro.

Recentemente il *neuroimaging* funzionale applicato allo studio del pensiero creativo ha posto l'attenzione sull'esplorazione di mappe di connettività funzionale di regioni cerebrali la cui attivazione è temporalmente correlata, chiamati *network* funzionali. Per esempio, in un recente studio di Beaty e collaboratori (2018) è stato chiesto a 163 partecipanti di eseguire il classico compito degli usi alternativi allo scopo di identificare i *network* funzionali associati all'abilità di generare idee altamente originali. Gli Autori hanno dimostrato che il cervello creativo ha la tendenza a innescare simultaneamente l'attivazione di regioni cerebrali distanti tra loro rispetto ad un cervello meno creativo. In particolare, i risultati dello studio hanno mostrato che la generazione di idee creative può essere predetta dal livello di connettività funzionale in specifiche aree cerebrali come la corteccia cingolata posteriore, corteccia prefrontale dorsolaterale di destra e insula anteriore sinistra, dimostrando che è possibile identificare un caratteristico profilo cerebrale di connettività funzionale associato al pensiero creativo (Beaty *et al.*, 2018). A tal proposito, un ulteriore interessante lavoro ha dimostrato che il pensiero divergente è in grado di innescare la collaborazione attiva di *network* cerebrali distanti che includono la corteccia prefrontale dorsolaterale e la corteccia cingolata posteriore, regioni cerebrali rispettivamente coinvolte nei processi immaginativi spontanei e nel controllo cognitivo (Beaty *et al.*, 2015). Compiti di tipo divergente, infatti, stimolano non solo pensieri immaginativi spontanei ma anche sistemi di controllo cognitivo, fondamentali per raggiungere alti livelli di attenzione focalizzata. In altre parole, nel corso del processo generativo, l'individuo ha la necessità di servirsi delle funzioni esecutive o strategiche allo scopo di soddisfare le specifiche richieste del compito (generare un'idea creativa), come ad esempio l'inibizione di risposte prevalenti (comuni) o la flessibilità cognitiva. Esaminando le strategie implicate nel classico compito degli usi alternativi, è stato infatti osservato che molte idee nuove riportate durante questo compito erano in realtà recuperate dalla memoria rispetto a idee generate *ex-novo* (es. Gilhooly, Fioratou, Anthony e Wynn, 2007). Per fare un esempio, pensare ad usi creativi per uno pneumatico potrebbe richiamare alla memoria un uso dell'oggetto alquanto familiare come altalena. Anche se il recupero di idee dalla memoria è una strategia utile, solo la generazione *ex novo* di idee può essere concepita come un atto realmente creativo, poiché coinvolge la creazione di nuove rappresentazioni semantiche che non erano già presenti in memoria (e cioè contenuti realmente originali). In parti-

colare, Benedek e collaboratori (2018) hanno indagato i meccanismi cerebrali associati alla generazione di idee nuove tramite il confronto di condizioni in cui ai partecipanti veniva chiesto di *a*) generare usi nuovi per oggetti quotidiani, *b*) rievocare usi nuovi per oggetti quotidiani, o *c*) rievocare usi comuni per oggetti quotidiani. Rispetto alla rievocazione di idee comuni, la generazione e la rievocazione di idee nuove mostra un *pattern* simile di attivazione cerebrale che include la corteccia prefrontale mediale e le aree paraippocampali bilaterali, indicando che la generazione *ex novo* di idee originali e la rievocazione di idee originali dalla memoria condividono gli stessi meccanismi. Tuttavia, la generazione di idee nuove, rispetto al recupero di idee, produce una maggiore attivazione del giro sopramarginale sinistro. Gli Autori hanno interpretato questi risultati come evidenza che la generazione di idee creative implica processi costruttivi simili a quelli coinvolti nel recupero di ricordi episodici, entrambi richiedenti la ricostruzione mentale di scene complesse, e che il giro sopramarginale sinistro è implicato nel processo di costruzione di rappresentazioni mentali realmente nuove (Benedek *et al.*, 2018). A tal riguardo, è interessante porre l'attenzione su uno studio che si è focalizzato su uno specifico meccanismo alla base del processo di pensiero divergente definito espansione concettuale, distinguendolo dagli altri meccanismi di pensiero divergente. L'espansione concettuale è un meccanismo chiave nella formulazione di nuove idee e corrisponde all'abilità di espandere le strutture concettuali di idee già presenti in memoria (Ward, 1994). Gli Autori hanno dimostrato che il meccanismo di espansione concettuale è in grado di innescare attivazioni cerebrali in specifiche regioni come il giro frontale antero-inferiore sinistro, i lobi temporali e la corteccia fronto-polare laterale, aree tipicamente coinvolte nei processi di ritenzione, recupero e integrazione dell'informazione semantica (Abraham *et al.*, 2012). Oltre agli studi che si sono focalizzati sui meccanismi e i processi alla base del pensiero divergente, esistono lavori fMRI che hanno indagato le strutture cerebrali coinvolte nel processo di pensiero divergente distinguendolo nelle sue fasi principali. Uno studio di Ellamil e collaboratori (Ellamil, Dobson, Beeman e Christoff, 2012), in particolare, ha impiegato una procedura sperimentale in grado di distinguere le componenti generative da quelle valutative nel corso del pensiero divergente, richiedendo ai partecipanti di generare le proprie idee e di valutarle in intervalli temporali differenti. I risultati dello studio hanno mostrato che la fase di generazione era principalmente associata all'attivazione di regioni cerebrali temporali mediali, che includono l'ippocampo e il paraippocampo, mentre la fase di valutazione era associata all'attivazione congiunta della corteccia prefrontale dorsolaterale, corteccia cingolata anteriore dorsale, corteccia prefrontale mediale, corteccia

cingolata posteriore/precuneus e giunzione temporoparietale. Gli Autori hanno dimostrato l'esistenza di differenti processi neurali alla base delle componenti generative e valutative del pensiero divergente, con un maggior coinvolgimento di meccanismi spontanei durante la fase iniziale di generazione e un maggior coinvolgimento di meccanismi strategici o di controllo durante la fase successiva di valutazione.

La ricerca neuroscientifica sembra dunque suggerire che la generazione di idee creative è un processo complesso che richiede il coinvolgimento di strutture cerebrali distinte e distanti tra loro che interagiscono su larga scala in modo dinamico. Recentemente, per spiegare i meccanismi neurali alla base del processo di pensiero creativo, è stata proposta l'interazione tra reti neurali distribuite in diverse regioni corticali e sottocorticali o *large scale networks*, e in particolare tra il *default mode network* (DMN) e l'*executive control network* (ECN) che, nonostante manifestino una relazione naturale antagonista, tenderebbero a cooperare durante l'ideazione creativa (Beaty, Benedek, Silvia e Schacter, 2016). Il DMN, che include la corteccia prefrontale mediale (MPFC), la corteccia cingolata posteriore (PCC)/precuneo, e la giunzione temporoparietale (TPJ), sembrerebbe principalmente coinvolto nei pensieri «autogenerati» o spontanei, probabilmente guidati dalla memoria a lungo termine (es. Benedek *et al.*, 2014; Fink *et al.*, 2009a; Kleibeuker *et al.*, 2013; Raichle *et al.*, 2001), mentre l'ECN, che include la corteccia prefrontale dorsolaterale (DLPFC) e la corteccia cingolata anteriore dorsale (dACC), sembrerebbe reclutato durante compiti caratterizzati da alto controllo cognitivo, come funzioni strategiche associate ad attenzione diretta o *working memory* (Desimone e Duncan, 1995; Miller e Cohen, 2001). A tal proposito, Beaty e collaboratori (2015), attraverso uno studio fMRI, hanno coinvolto un gruppo di partecipanti nell'esecuzione del classico compito degli usi alternativi per comprendere la cooperazione (o competizione) di questi due *network* durante l'ideazione divergente. L'analisi di connettività funzionale ha mostrato una forte cooperazione tra i due *network* soprattutto nella fase finale del processo di pensiero divergente, quando il reclutamento delle funzioni esecutive o strategiche sono maggiormente richieste per soddisfare le richieste del compito, il che rifletterebbe, secondo gli Autori, un meccanismo di attenzione focalizzata verso l'interno e controllo *top-down* di processi immaginativi spontanei.

3. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Lo studio neuroscientifico del comportamento creativo, ed in particolare della cognizione creativa, ha prodotto negli ultimi decenni

una serie di risultati interessanti sulle dinamiche temporali e l'organizzazione delle strutture cerebrali associate al comportamento creativo. Il presente lavoro non intende essere una rassegna esaustiva della letteratura neuroscientifica sul comportamento creativo, ma ha voluto porre l'attenzione su alcuni risultati ottenuti dalla ricerca neuroscientifica nello studio di una modalità di pensiero associata al pensiero creativo, il pensiero divergente. La capacità di pensiero divergente è, infatti, al centro del processo di pensiero creativo e può anche essere mappato su componenti cognitive e metacognitive legate all'intelligenza (es. Benedek *et al.*, 2018; Guilford, 1956; Karwowski *et al.*, 2016; Kaufman e Plucker, 2011; Sternberg e O'Hara, 1999). Il lavoro si è perciò focalizzato sui risultati di alcuni recenti studi che hanno impiegato l'elettroencefalografia e la risonanza magnetica funzionale per esplorare i correlati neurali associati al processo creativo di tipo divergente, misurato principalmente attraverso il classico compito degli usi alternativi. I risultati derivanti dagli studi neuroscientifici che hanno indagato altre forme di comportamento creativo, come il *problem solving* o l'*insight*, risultano per certi versi difficili da confrontare (Arden *et al.*, 2010). Questa difficoltà sembra presumibilmente dipendere da: 1) la vasta gamma di metodologie utilizzate per monitorare il comportamento creativo di tipo convergente che, di conseguenza, ha prodotto risultati di varia natura, e 2) l'eterogeneità nell'operationalizzare la prestazione creativa in qualità di *insight* o *problem solving* durante le diverse misurazioni (es. Dietrich e Kanso, 2010; Mastria, Agnoli, Zanon, Lubart e Corazza, 2018). Per tale ragione la presente rassegna si è principalmente focalizzata sui risultati di alcuni tra i più rilevanti lavori neuroscientifici riguardanti lo studio del pensiero divergente, dai quali è possibile estrarre una soddisfacente coerenza circa il funzionamento del nostro cervello. Come detto in precedenza, inoltre, il pensiero divergente è stato identificato come la modalità di pensiero in grado di rappresentare con maggiore approssimazione il potenziale creativo dell'individuo e quindi come oggetto di studio principale per l'indagine del comportamento creativo. Sebbene questa scelta consenta di ridurre al minimo le difficoltà interpretative determinate dall'eterogeneità dei risultati, vale la pena sottolineare che gli studi presi in esame manifestano una forte variabilità in termini tecnici e metodologici. I compiti impiegati per esaminare il pensiero divergente sembrano, infatti, differire tra loro per alcune proprietà metodologiche di base, come ad esempio: 1) le istruzioni impiegate nei diversi compiti, che in alcuni casi stimolavano la produzione di idee di qualità (originalità), in altri indirizzavano verso la quantità di idee da produrre (fluenza), 2) la durata del compito, che poteva variare da pochi secondi a diversi minuti, 3) la variabilità nella modalità di presentazione degli stimoli che elicitarono la produ-

zione di idee creative, da verbale a visiva e 4) il genere del gruppo di partecipanti coinvolti, non sempre bilanciato. Tutti esempi di variabili metodologiche che inevitabilmente influenzano i risultati ottenuti. Il *pattern* di attività alfa associato al pensiero divergente dipende infatti dalle specifiche richieste di elaborazione del compito. Un chiaro esempio proviene dallo studio pionieristico di Martindale e Hasenfus (1978), in cui partecipanti che avevano ricevuto istruzione di essere originali manifestavano maggiore potenza alfa durante l'ispirazione creativa rispetto ai partecipanti che non avevano ricevuto tale istruzione. Non solo il tipo di istruzione, ma anche la durata del compito, in particolare la finestra temporale richiesta ai partecipanti per generare idee creative, è un fattore importante da tenere in considerazione per un'adeguata interpretazione dei meccanismi e processi coinvolti nel pensiero creativo. La ricerca dell'originalità richiede tempo, poiché implica una fase precoce di inibizione di risposte dominanti o comuni provenienti dalla memoria seguita da una fase più tardiva di ricombinazione di concetti semanticamente non collegati (Gilhooly *et al.*, 2007). Tipicamente un partecipante è in grado di produrre circa quattro idee al minuto in un classico compito degli usi alternativi (Benedek *et al.*, 2013). La richiesta di generare usi alternativi per un oggetto quotidiano entro 10 secondi (si veda ad esempio Schwab *et al.*, 2014) permetterebbe ad un partecipante di produrre non più di una idea. Tale finestra temporale potrebbe non riflettere la genuina generazione di un'idea originale, ma includere un meccanismo di inibizione di risposte comuni, indispensabile per produrre un'idea realmente creativa, soprattutto nei casi in cui le istruzioni stimolano l'originalità. Gli studi che hanno esplorato il decorso temporale del pensiero divergente, dalla produzione di idee comuni a quelle più originali, mostrano, infatti, un'attivazione cerebrale differenziale in termini di modulazione alfa in funzione delle diverse fasi di elaborazione (precoce *vs.* tardiva) del processo ideativo di tipo divergente (Agnoli *et al.*, 2020; si veda anche Jauk *et al.*, 2012; Rominger *et al.*, 2019). Un altro fattore metodologico che sembra influenzare significativamente i risultati riguarda la modalità di presentazione degli stimoli. Uno studio in particolare ha confrontato compiti divergenti di tipo verbale e visivo (Jaušovec e Jaušovec, 2000), mostrando che la modalità verbale, in quanto caratterizzata da una prevalente elaborazione concettuale dello stimolo, elicitava maggiore potenza alfa rispetto alla modalità visiva, che richiede invece una maggiore elaborazione sensoriale delle proprietà visuo-spaziali dello stimolo. È importante infine porre l'accento sul ruolo di potenziali differenze di genere nel comportamento creativo. Sebbene la letteratura di riferimento non mostri differenze significative relative al genere (Baer e Kaufman, 2008), se non limitatamente associate alla cooperazione interemisferica tra

maschi e femmine durante la soluzione corretta di compiti creativi (Razumnikova, 2004), il coinvolgimento di campioni rappresentativi consentirebbe analisi specifiche associate a potenziali differenze di genere.

Si auspica che la ricerca futura in questo ambito adotti un modello teorico che tenga conto degli effetti delle diverse manipolazioni sperimentali, in modo da avviare uno studio sistematico dei substrati neurali dell'ideazione creativa, che favorisca replicabilità e robustezza dei risultati. La coerenza negli aspetti di base relativi ai disegni sperimentali impiegati eviterebbe che i risultati appaiano difficilmente confrontabili e faticosamente integrabili in modo ragionevole. Tuttavia, è bene notare che la concordanza dei risultati e la replicabilità degli effetti emersa nella analisi della letteratura neuroscientifica sul pensiero divergente esigerebbe in un futuro prossimo una indagine meta-analitica che tenga conto delle differenze metodologiche sopra elencate per comprendere la robustezza e la grandezza degli effetti sinora emersi soprattutto nella ricerca elettroencefalografica.

Dall'analisi della letteratura sopra descritta è possibile, inoltre, estrarre interessanti riflessioni. Risulta chiaro come le basi neurali del pensiero divergente non possano essere quantificate in termini di «attivazione» o «deattivazione» di alcune specifiche regioni cerebrali e che il processo ideativo non possa essere «localizzato» in specifiche aree cerebrali. La generazione di idee creative si manifesta, viceversa, in specifiche dinamiche temporali cerebrali e attivazioni funzionali tra aree cerebrali associate a complessi *network* neurali, che riflettono il coinvolgimento di processi cognitivi di base come memoria, attenzione e controllo cognitivo. È interessante notare come i risultati offerti dalle neuroscienze trovino una soddisfacente modellizzazione teorica in termini psicologici e cognitivi. Considerando ad esempio il classico lavoro di Campbell (1960), le dinamiche temporali associate al processo ideativo rifletterebbero un comportamento esplorativo capace di aprire nuovi percorsi verso risposte inusuali o associazioni inesplorate, procedendo da diversi punti di partenza e cambiando direzione di fronte all'inefficacia. Per fornire un altro esempio, la teoria multivariata secondo cui il processo creativo è caratterizzato dall'interazione dinamica di fattori «centrati sulla persona» (abilità cognitive, impulsi motivazionali e tratti della personalità) e «influenze contestuali» derivate dall'ambiente (Lubart, 1999; Sternberg e Lubart, 1995), fornisce un'ottima base di partenza per interpretare, classificare ed esplorare la ricerca nell'ambito delle neuroscienze (si veda Mastria *et al.*, 2018).

Studi futuri potrebbero manipolare metodologicamente nei loro disegni sperimentali le richieste attentive e/o mnestiche durante l'idea-

zione creativa per riuscire a comprendere in modo più diretto il ruolo svolto da questi processi nel decorso temporale del pensiero creativo, consentendo così interpretazioni più realistiche sul loro contributo. A questo proposito, è importante sottolineare la necessità di approfondire non solo il ruolo dei processi cognitivi come attenzione, memoria e controllo cognitivo nel pensiero creativo di tipo divergente, ma anche il ruolo giocato della motivazione e la sua interazione con queste funzioni cognitive di base, nell'emergere del comportamento creativo. La motivazione, infatti, svolge un ruolo chiave nel comportamento creativo (es. Agnoli e Corazza, 2019; Agnoli *et al.*, 2019; Agnoli *et al.*, 2018; Amabile, 1996; Shalley, Zhou e Oldham, 2004), modulando potenzialmente le diverse funzioni cognitive che lo caratterizzano. Fino ad ora la relazione tra motivazione e pensiero creativo è stata principalmente indagata rispetto al potenziale impatto che l'esperienza emozionale ha sul comportamento creativo (es. Ashby e Isen, 1999; Baas, De Dreu e Nijstad, 2012; Chermahini e Hommel, 2010; Cristofori, Salvi, Beeman e Grafman, 2018; Friedman e Förster, 2002; Isen, Daubman e Nowicki, 1987; Mastria, Agnoli e Corazza, 2019; si veda anche Baas, De Dreu e Nijstad, 2008, 2012; Davis, 2009; De Dreu, Baas e Nijstad, 2008). Manca, tuttavia, in letteratura, un'indagine indirizzata al potenziale ruolo che la motivazione riveste nel modulare i processi e i meccanismi neurali di base caratterizzanti la cognizione creativa. Gli sviluppi ottenuti in questa direzione avranno poi necessità di essere replicati in differenti studi e laboratori, permettendo così, nel lungo periodo, la generazione di teorie neurocognitive che includano il ruolo chiave svolto dalla motivazione nel comportamento creativo, nonché una comprensione esauriente di questa complessa, ma molto affascinante, interazione tra cognizione e motivazione creativa alla base del processo di pensiero creativo.

Sebbene recenti lavori abbiano già affrontato l'argomento (Agnoli *et al.*, 2020; Kraus *et al.*, 2019; Rominger *et al.*, 2019), studi futuri potrebbero esplorare in maggior dettaglio le dinamiche temporali associate all'ideazione creativa, focalizzandosi su quali specifici meccanismi o processi cognitivi intervengono durante questo comportamento esplorativo in funzione del tempo. Interessanti progressi in questo senso derivano dal gruppo di ricerca di Agnoli e collaboratori (2020), i quali hanno impiegato l'alta risoluzione temporale dell'EEG per indagare il decorso temporale del pensiero divergente, riuscendo a predire l'emergere dell'originalità attraverso la sincronizzazione dell'attività oscillatoria alfa. Tuttavia, questo lavoro EEG sull'ideazione creativa, come molti altri, si è prevalentemente concentrato su un'analisi delle oscillazioni cerebrali nel dominio del tempo. Sarebbe interessante utilizzare in futuro altri approcci basati invece su strumenti di analisi nel dominio tempo-frequenza, che consentirebbero una stima,

all'interno di ogni singola epoca, della potenza del segnale EEG in funzione sia del tempo che della frequenza.

Lo studio del pensiero divergente in funzione del tempo potrebbe anche essere approfondito attraverso l'utilizzo di metodiche di stimolazione elettrica non invasiva, per esplorare un nesso diretto di causa ed effetto. A tal proposito, è interessante porre l'attenzione su alcuni primi tentativi di indagine del ruolo causale di specifiche oscillazioni neurali e regioni cerebrali coinvolte nel comportamento creativo di tipo divergente. Per esempio, sono stati evidenziati effetti benefici della stimolazione della banda di frequenza alfa (Grabner *et al.*, 2018) e beta (Agnoli *et al.*, 2018) sulla prestazione a compiti di pensiero divergente, misurato in termini di originalità e fluenza. Altri interessanti lavori hanno mostrato un coinvolgimento diretto di specifiche regioni cerebrali sul pensiero divergente. È stato possibile ad esempio incrementare l'originalità delle risposte fornite ad un classico compito di usi alternativi attraverso la stimolazione del DLPFC di sinistra (Peña, Sampedro, Ibarretxe-Bilbao, Zubiaurre-Elorza e Ojeda, 2019; si veda anche Chrysikou e Thompson-Schill, 2011). È stato inoltre recentemente dimostrato come una stimolazione dinamica (da sinistra a destra; Khalil *et al.*, 2020) o inversa (deattivazione sinistra e attivazione destra; Hertenstein *et al.*, 2019) di entrambi gli emisferi del giro frontale inferiore possa modulare la prestazione creativa con un incremento evidente dell'abilità di tipo divergente (per una rassegna sull'argomento si veda Lucchiari, Sala e Vanutelli, 2018).

In ultimo, sarà importante spostarsi verso la comprensione dei meccanismi neurali durante compiti creativi più ecologici o complessi, legati alla vita reale. Un esempio in questo senso è offerto da alcuni lavori che hanno esteso l'approccio neuroscientifico al dominio della creatività artistica o sportiva, come l'indagine dei meccanismi neurali associati all'improvvisazione musicale o all'arte visiva e corporea o all'improvvisazione sportiva nel caso di giocatori di calcio (Bhattacharya e Petsche, 2005; Fink *et al.*, 2009a; Fink *et al.*, 2019; Limb e Braun, 2008). Questo approccio può, in particolare, fornire importanti risultati riguardo alle componenti neurali comuni o specifiche nella generazione creativa tra diversi domini di conoscenza. Ne è un esempio il recente lavoro di Chen e colleghi (Chen, Beaty e Qiu, 2020) sul coinvolgimento di un set comune di aree cerebrali legate al controllo motorio (ad esempio simulazione e pianificazione motoria) nell'improvvisazione grafica, di scrittura e musicale (pre-SMA, DLPFC sinistra e IFG destro). A questo proposito, piuttosto che il coinvolgimento di studenti universitari, sarebbe interessante reclutare partecipanti considerati come particolarmente creativi (ad esempio musicisti, artisti e ballerini) per favorire la generalizzabilità dei risultati anche in contesti di vita reale.

Dunque, dall'analisi della ricerca neuroscientifica sul pensiero creativo emerge che, da un lato, la tecnica elettroencefalografica è uno strumento valido per la misurazione delle dinamiche temporali associate al processo ideativo e, dall'altro, l'fMRI ha favorito una comprensione più profonda della cooperazione funzionale tra diverse aree cerebrali durante l'ideazione creativa. Tuttavia, allo scopo di comprendere maggiormente i *network* di connettività funzionale associati alla complessa abilità creativa, gli studi futuri potrebbero focalizzarsi non solo sui singoli parametri cerebrali ma, piuttosto, sull'uso combinato di approcci di misurazione neuroscientifica funzionalmente ben definiti. Un approccio di misurazione combinato applicato sugli stessi compiti creativi che integri i vantaggi temporali dell'EEG e le prerogative spaziali dell'fMRI potrebbe aiutare a caratterizzare in maggior dettaglio i processi e i meccanismi cognitivi coinvolti nella cognizione creativa (si veda Fink *et al.*, 2009a per un primo tentativo in questa direzione). Concludendo, dagli studi presi in esame emerge chiaramente che specifici processi cognitivi possono essere identificati e indagati durante compiti di pensiero divergente e, in particolare, nella fase di ideazione di risposte originali. Si spera che con il presente lavoro la comunità scientifica abbracci l'approccio secondo cui il complesso costruito della creatività possa essere indagato da un punto di vista neuroscientifico, attraverso la sezione di questo complesso comportamento in diverse modalità di pensiero indagabili tramite precisi paradigmi di ricerca sperimentale. Il caso dell'indagine neuroscientifica del pensiero divergente descritto in questo lavoro mostra infatti come il processo di generazione di idee creative possa essere scomposto in processi cognitivi di base, mantenendo allo stesso tempo valide proprietà psicometriche nella misurazione della prestazione creativa.

BIBLIOGRAFIA

- ABRAHAM A. (2016). The imaginative mind. *Human Brain Mapping*, 37 (11), 4197-4211.
- ABRAHAM A., PIERITZ K., THYBUSCH K., RUTTER B., KRÖGER S., SCHWECKENDIEK J., STARK R., WINDMANN S., HERMANN C. (2012). Creativity and the brain: Uncovering the neural signature of conceptual expansion. *Neuropsychologia*, 50 (8), 1906-1917.
- AGNOLI S., CORAZZA G.E. (2019). Emotions: The spinal cord of the creative thinking process. In R.A. Beghetto, G.E. Corazza (eds.), *Dynamic perspectives on creativity*. New York: Springer, pp. 47-65.
- AGNOLI S., FRANCHIN L., RUBALTELLI E., CORAZZA G.E. (2019). The emotionally intelligent use of attention and affective arousal under creative frustration and creative success. *Personality and Individual Differences*, 142, 242-248.

- AGNOLI S., RUNCO M.A., KIRSCH C., CORAZZA G.E. (2018). The role of motivation in the prediction of creative achievement inside and outside of school environment. *Thinking Skills and Creativity*, 28, 167-176.
- AGNOLI S., ZANON M., MASTRIA S., AVENANTI A., CORAZZA G.E. (2018). Enhancing creative cognition with a rapid right-parietal neurofeedback procedure. *Neuropsychologia*, 118, 99-106.
- AGNOLI S., ZANON M., MASTRIA S., AVENANTI A., CORAZZA G.E. (2020). Predicting response originality through brain activity: An analysis of changes in EEG alpha power during the generation of alternative ideas. *NeuroImage*, 207, 116385.
- AMABILE T.M. (1983). Social psychology of creativity: A componential conceptualization. *Journal of Personality and Social Psychology*, 45, 357-376.
- AMABILE T.M. (1996). *Creativity and innovation in organizations* (Vol. 5). Boston, MA: Harvard Business School.
- ARDEN R., CHAVEZ R.S., GRAZIOPLANE R., JUNG R.E. (2010). Neuroimaging creativity: A psychometric review. *Behavioural Brain Research*, 214, 143-156.
- ASHBY F.G., ISEN A.M. (1999). A neuropsychological theory of positive affect and its influence on cognition. *Psychological Review*, 106 (3), 529-550.
- BAAS M., DE DREU C.K., NIJSTAD B.A. (2008). A meta-analysis of 25 years of mood-creativity research: Hedonic tone, activation, or regulatory focus? *Psychological Bulletin*, 134 (6), 779-806.
- BAAS M., DE DREU C., NIJSTAD B.A. (2012). Emotions that associate with uncertainty lead to structured ideation. *Emotion*, 12 (5), 1004-1014.
- BAER J., KAUFMAN J.C. (2008). Gender differences in creativity. *Journal of Creative Behavior*, 42 (2), 75-105.
- BALL L.J., CHRISTENSEN B.T. (2020). How sticky notes support cognitive and socio-cognitive processes in the generation and exploration of creative ideas. In B.T. Christensen, K. Halskov, C. Klokmoose (eds.), *Sticky Creativity*. New York: Academic Press, pp. 19-51.
- BEATY R.E., BENEDEK M., KAUFMAN S.B., SILVIA P.J. (2015). Default and executive network coupling supports creative idea production. *Scientific Reports*, 5, 10964.
- BEATY R.E., BENEDEK M., SILVIA P.J., SCHACTER D.L. (2016). Creative cognition and brain network dynamics. *Trends in Cognitive Sciences*, 20 (2), 87-95.
- BEATY R.E., KENETT Y.N., CHRISTENSEN A.P., ROSENBERG M.D., BENEDEK M., CHEN Q., FINK A., QUI J., KWAPIL T.R., KANE M.J., SILVIA P.J. (2018). Robust prediction of individual creative ability from brain functional connectivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115 (5), 1087-1092.
- BENEDEK M. (2018). The neuroscience of creative idea generation. In Z. Kapoula, E. Volle, J. Renoult, M. Andreatta (eds.), *Exploring transdisciplinarity in art and sciences*. New York: Springer, pp. 31-48.
- BENEDEK M., BERGNER S., KÖNEN T., FINK A., NEUBAUER A.C. (2011). EEG alpha synchronization is related to top-down processing in convergent and divergent thinking. *Neuropsychologia*, 49 (12), 3505-3511.
- BENEDEK M., FINK A. (2019). Toward a neurocognitive framework of creative cognition: The role of memory, attention, and cognitive control. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 116-122.
- BENEDEK M., JAUK E., BEATY R.E., FINK A., KOSCHUTNIG K., NEUBAUER A.C. (2016). Brain mechanisms associated with internally directed attention and self-generated thought. *Scientific Reports*, 6, 22959.

- BENEDEK M., JUNG R.E., VARTANIAN O. (2018). The neural bases of creativity and intelligence: Common ground and differences. *Neuropsychologia*, 118 (Part A), 1-3.
- BENEDEK M., MÜHLMANN C., JAUKE E., NEUBAUER A.C. (2013). Assessment of divergent thinking by means of the subjective top-scoring method: Effects of the number of top-ideas and time-on-task on reliability and validity. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 7 (4), 341-349.
- BENEDEK M., NORDTVEDT N., JAUKE E., KOSCHMIEDER C., PRETSCH J., KRAMMER G., NEUBAUER A.C. (2016). Assessment of creativity evaluation skills: A psychometric investigation in prospective teachers. *Thinking Skills and Creativity*, 21, 75-84.
- BENEDEK M., SCHICKEL R.J., JAUKE E., FINK A., NEUBAUER A.C. (2014). Alpha power increases in right parietal cortex reflects focused internal attention. *Neuropsychologia*, 56, 393-400.
- BENEDEK M., SCHÜES T., BEATY R.E., JAUKE E., KOSCHUTNIG K., FINK A., NEUBAUER A.C. (2018). To create or to recall original ideas: Brain processes associated with the imagination of novel object uses. *Cortex*, 99, 93-102.
- BHATTACHARYA J., PETSCHKE H. (2005). Drawing on mind's canvas: Differences in cortical integration patterns between artists and non-artists. *Human Brain Mapping*, 26 (1), 1-14.
- CAMPBELL D.T. (1960). Blind variation and selective retention in creative thought as in other knowledge processes. *Psychological Review*, 67, 380-400.
- CEH S.M., ANNERER-WALCHER S., KÖRNER C., ROMINGER C., KOBER S.E., FINK A., BENEDEK M. (2020). Neurophysiological indicators of internal attention: An electroencephalography – Eye-tracking coregistration study. *Brain and Behavior*, e01790.
- CORAZZA G.E. (2016). Potential originality and effectiveness: The dynamic definition of creativity. *Creativity Research Journal*, 28 (3), 258-267.
- CORAZZA G.E., LUBART T. (2020). The Big Bang of originality and effectiveness: A dynamic creativity framework and its application to scientific missions. *Frontiers in Psychology*, 11, 2472.
- CORAZZA G.E., DE SAINT-LAURENT C. (2020). Regional creativity: Research publications by region. In M. Runco, S. Pritzker (eds.), *Encyclopedia of creativity* (3rd ed., vol. 2). New York: Academic Press, pp. 423-428.
- CHEN Q.L., BEATY R.E., QIU J. (2020). Mapping the artistic brain: Common and distinct neural activations associated with musical, drawing, and literary creativity. *Human Brain Mapping*, 41 (12), 3403-3419.
- CHEN Q.L., XU T., YANG W.J., LI Y.D., SUN J.Z., WANG K.C., ... QIU J. (2015). Individual differences in verbal creative thinking are reflected in the precuneus. *Neuropsychologia*, 75, 441-449.
- CHERMAHIN S.A., HOMMEL B. (2010). The (b)link between creativity and dopamine: Spontaneous eye blink rates predict and dissociate divergent and convergent thinking. *Cognition*, 115 (3), 458-465.
- CHRISTENSEN P.R., GUILFORD J.P., WILSON R.C. (1957). Relations of creative responses to working time and instructions. *Journal of Experimental Psychology*, 53 (2), 82-88.
- CHRYSIKOU E.G., THOMPSON-SCHILL S.L. (2011). Dissociable brain states linked to common and creative object use. *Human Brain Mapping*, 32 (4), 665-675.
- CRISTOFORI I., SALVI C., BEEMAN M., GRAFMAN J. (2018). The effects of expected reward on creative problem solving. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 18 (5), 925-931.

- CSIKSZENTMIHALYI M. (1988). The flow experience and its significance for human psychology. In M. Csikszentmihalyi, I.S. Csikszentmihalyi (eds.), *Optimal experience: Psychological studies of flow in consciousness*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 15-35.
- DAVIS M.A. (2009). Understanding the relationship between mood and creativity: A meta-analysis. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 108 (1), 25-38.
- DE DREU C.K., BAAS M., NIJSTAD B.A. (2008). Hedonic tone and activation level in the mood-creativity link: Toward a dual pathway to creativity model. *Journal of Personality and Social Psychology*, 94 (5), 739-756.
- DESIMONE R., DUNCAN J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, 18 (1), 193-222.
- DIETRICH A. (2003). Functional neuroanatomy of altered states of consciousness: The transient hypofrontality hypothesis. *Consciousness and Cognition*, 12 (2), 231-256.
- DIETRICH A., KANSO R. (2010). A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psychological Bulletin*, 136, 822-848.
- DOMINOWSKI R.L., DALLOB P. (1995). Insight and problem solving. In R.J. Sternberg, J.E. Davidson (eds.), *The nature of insight*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 33-62.
- ELLAMIL M., DOBSON C., BEEMAN M., CHRISTOFF K. (2012). Evaluative and generative modes of thought during the creative process. *Neuroimage*, 59 (2), 1783-1794.
- FINK A., BAY J.U., KOSCHUTNIG K., PRETTENTHALER K., ROMINGER C., BENEDEK M., PAPOUSEK I., WEISS E.M., SEIDEL A., MEMMERT D. (2019). Brain and soccer: Functional patterns of brain activity during the generation of creative moves in real soccer decision-making situations. *Human Brain Mapping*, 40 (3), 755-764.
- FINK A., BENEDEK M. (2014). EEG alpha power and creative ideation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 111-123.
- FINK A., BENEDEK M., GRABNER R.H., STAUDT B., NEUBAUER A.C. (2007). Creativity meets neuroscience: Experimental tasks for the neuroscientific study of creative thinking. *Methods*, 42 (1), 68-76.
- FINK A., GRABNER R.H., BENEDEK M., REISHOFER G., HAUSWIRTH V., FALLY M., NEUPER C., EBNER F., NEUBAUER A.C. (2009a). The creative brain: Investigation of brain activity during creative problem solving by means of EEG and fMRI. *Human Brain Mapping*, 30, 734-748.
- FINK A., GRAIF B., NEUBAUER A.C. (2009b). Brain correlates underlying creative thinking: EEG alpha activity in professional vs. novice dancers. *NeuroImage*, 46 (3), 854-862.
- FINK A., KOSCHUTNIG K., HUTTERER L., STEINER E., BENEDEK M., WEBER B., REISHOFER G., PAPOUSEK I., WEISS E.M. (2014). Gray matter density in relation to different facets of verbal creativity. *Brain Structure and Function*, 219 (4), 1263-1269.
- FINK A., NEUBAUER A.C. (2006). EEG alpha oscillations during the performance of verbal creativity tasks: Differential effects of sex and verbal intelligence. *International Journal of Psychophysiology*, 62 (1), 46-53.
- FORTHMANN B., GERWIG A., HOLLING H., CELIK P., STORME M., LUBART T. (2016). The be-creative effect in divergent thinking: The interplay of instruction and object frequency. *Intelligence*, 57, 25-32.
- FRIEDMAN R.S., FÖRSTER J. (2002). The influence of approach and avoidance motor actions on creative cognition. *Journal of Experimental Social Psychology*, 38 (1), 41-55.

- GABORA L. (2005). Creative thought as a non Darwinian evolutionary process. *Journal of Creative Behavior*, 39 (4), 262-283.
- GALTON F. (1869). *Hereditary genius: An inquiry into its laws and consequences* (Vol. 27). London: Macmillan.
- GILHOOLY K.J., FIORATOU E., ANTHONY S.H., WYNN V. (2007). Divergent thinking: Strategies and executive involvement in generating novel uses for familiar objects. *British Journal of Psychology*, 98 (4), 611-625.
- GLĂVEANU V.P., HANCHETT HANSON M., BAER J., BARBOT B., CLAPP E.P., CORAZZA G.E., HENNESSEY B., KAUFMAN J.C., LEBUDA I., LUBART T., MONTUORI A., NESS I.J., PLUCKER J., REITER-PALMON R., SIERRA Z., SIMONTON D.K., NEVES-PEREIRA M.S., STERNBERG R.J. (2020). Advancing creativity theory and research: A socio-cultural manifesto. *Journal of Creative Behavior*, 54 (3), 741-745.
- GONEN-YAACOVI G., DE SOUZA L.C., LEVY R., URBANSKI M., JOSSE G., VOLLE E. (2013). Rostral and caudal prefrontal contribution to creativity: a meta-analysis of functional imaging data. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 465.
- GRABNER R.H., FINK A., NEUBAUER A.C. (2007). Brain correlates of self-rated originality of ideas: evidence from event-related power and phase-locking changes in the EEG. *Behavioral Neuroscience*, 121 (1), 224-230.
- GRABNER R.H., KRENN J., FINK A., ARENDASY M., BENEDEK M. (2018). Effects of alpha and gamma transcranial alternating current stimulation (tACS) on verbal creativity and intelligence test performance. *Neuropsychologia*, 118, 91-98.
- GUILFORD J.P. (1950). Creativity. *American Psychologist*, 5, 444-454. Hayes, J.R. (1989). *The complete problem solver* (2nd ed.). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- GUILFORD J.P. (1956). The structure of intellect. *Psychological Bulletin*, 53 (4), 267-293.
- GUILFORD J.P. (1967). Creativity: Yesterday, today and tomorrow. *Journal of Creative Behavior*, 1 (1), 3-14.
- HANSLMAYR S., GROSS J., KLIMESCH W., SHAPIRO K.L. (2011). The role of alpha oscillations in temporal attention. *Brain Research Reviews*, 67 (1-2), 331-343.
- HAO N., KU Y., LIU M., HU Y., BODNER M., GRABNER R.H., FINK A. (2016). Reflection enhances creativity: Beneficial effects of idea evaluation on idea generation. *Brain and Cognition*, 103, 30-37.
- HARRINGTON D.M. (1975). Effects of explicit instructions to «be creative» on the psychological meaning of divergent thinking test scores 1. *Journal of Personality*, 43 (3), 434-454.
- HERTENSTEIN E., WAIBEL E., FRASE L., RIEMANN D., FEIGE B., NITSCHKE M.A., KALLER C.P., NISSEN C. (2019). Modulation of creativity by transcranial direct current stimulation. *Brain Stimulation*, 12 (5), 1213-1221.
- ISEN A.M., DAUBMAN K.A., NOWICKI G.P. (1987). Positive affect facilitates creative problem solving. *Journal of Personality and Social Psychology*, 52 (6), 1122-1131.
- JAUK E., BENEDEK M., NEUBAUER A.C. (2012). Tackling creativity at its roots: Evidence for different patterns of EEG alpha activity related to convergent and divergent modes of task processing. *International Journal of Psychophysiology*, 84 (2), 219-225.
- JAUŠOVEC N., JAUŠOVEC K. (2000). EEG activity during the performance of complex mental problems. *International Journal of Psychophysiology*, 36, 73-88.

- JENSEN O., MAZAHERI A. (2010). Shaping functional architecture by oscillatory alpha activity: Gating by inhibition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4, 1-8.
- JOHNS G.A., MORSE L.W., MORSE D.T. (2001). An analysis of early vs. later responses on a divergent production task across three time press conditions. *Journal of Creative Behavior*, 35 (1), 65-72.
- JOHNSON-LAIRD P.N. (2006). *How we reason*. Oxford: Oxford University Press.
- KARWOWSKI M., DUL J., GRALEWSKI J., JAUK E., JANKOWSKA D.M., GAJDA A., CHRUSZCZEWSKI M.H., BENEDEK M. (2016). Is creativity without intelligence possible? A necessary condition analysis. *Intelligence*, 57, 105-117.
- KAUFMAN J.C., PLUCKER J.A. (2011). Intelligence and creativity. In R.J. Sternberg, S.B. Kaufman (eds.), *Cambridge handbooks in psychology. The Cambridge handbook of intelligence*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 771-783.
- KAUFMAN J.C., PLUCKER J.A., BAER J. (2008). *Essentials of creativity assessment* (Vol. 53). Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- KAUFMAN J.C., STERNBERG R.J. (eds.). (2006). *The international handbook of creativity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- KHALIL R., KARIM A.A., KONDINSKA A., GODDE B. (2020). Effects of transcranial direct current stimulation of left and right inferior frontal gyrus on creative divergent thinking are moderated by changes in inhibition control. *Brain Structure and Function*, 225 (6), 1691-1704.
- KLEIBEUKER S., KOOLSCHIJN P.C., JOLLES D., DE DREU C., CRONE E.A. (2013). The neural coding of creative idea generation across adolescence and early adulthood. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 905.
- KLIMESCH W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences*, 16 (12), 606-617.
- KLIMESCH W., SAUSENG P., HANSLMAYR S. (2007). EEG alpha oscillations: The inhibition-timing hypothesis. *Brain Research Reviews*, 53 (1), 63-88.
- KOUNIOS J., FLECK J.I., GREEN D.L., PAYNE L., STEVENSON J.L., BOWDEN E.M., JUNG-BEEMAN M. (2008). The origins of insight in resting-state brain activity. *Neuropsychologia*, 46 (1), 281-291.
- KRAUS B., CADLE C., SIMON-DACK S. (2019). EEG alpha activity is moderated by the serial order effect during divergent thinking. *Biological Psychology*, 145, 84-95.
- LIMB C.J., BRAUN A.R. (2008). Neural substrates of spontaneous musical performance: An fMRI study of jazz improvisation. *PLoS one*, 3 (2).
- LUCCHIARI C., SALA P.M., VANUTELLI M.E. (2018). Promoting creativity through transcranial direct current stimulation (tDCS). A critical review. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 12, 167.
- LUBART T. (1999). Componential theories of creativity. In M.A. Runco, S. Pritzner (eds.), *Encyclopedia of creativity*. New York: Academic Press.
- LUBART T. (2018). Creativity across the Seven Cs. In R.J. Sternberg, J.C. Kaufman (eds.), *The nature of human creativity*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 134-146.
- LUBART T.I., ZENASNI F., BARBOT B. (2013). Creative potential and its measurement. *International Journal of Talent Development and Creativity*, 1 (2), 41-51.
- LUFT C.D.B., ZIOGA I., THOMPSON N.M., BANISSY M.J., BHATTACHARYA J. (2018). Right temporal alpha oscillations as a neural mechanism for inhib-

- iting obvious associations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115 (52), E12144-E12152.
- MARTINDALE C. (1999). Biological bases of creativity. In R. Sternberg (ed.), *Handbook of creativity*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 137-152.
- MARTINDALE C., HASENFUS N. (1978). EEG differences as a function of creativity, stage of the creative process, and effort to be original. *Biological Psychology*, 6 (3), 157-167.
- MARTINDALE C., MINES D. (1975). Creativity and cortical activation during creative, intellectual and EEG feedback tasks. *Biological Psychology*, 3 (2), 91-100.
- MASTRIA S., AGNOLI S., CORAZZA G.E. (2019). How does emotion influence the creativity evaluation of exogenous alternative ideas? *PloS one*, 14 (7).
- MASTRIA S., AGNOLI S., ZANON M., LUBART T., CORAZZA G.E. (2018). Creative brain, creative mind, creative person. In Z. Kapoula, E. Volle, J. Renault, M. Andreatta (eds.), *Exploring transdisciplinarity in art and sciences*. New York: Springer, pp. 3-29.
- MAYER R.E. (1995). The search for insight: Grappling with Gestalt psychology's unanswered questions. In R.J. Sternberg (ed.), *The nature of insight*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 3-32.
- MEKERN V., HOMMEL B., SJOERDS Z. (2019). Computational models of creativity: A review of single-process and multi-process recent approaches to demystify creative cognition. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 47-54.
- MILGRAM R.M., RABKIN L. (1980). Developmental test of Mednick's associative hierarchies of original thinking. *Developmental Psychology*, 16 (2), 157-158.
- MILLER E.K., COHEN J.D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24 (1), 167-202.
- MUMFORD M.D., GUSTAFSON S.B. (1988). Creativity syndrome: Integration, application, and innovation. *Psychological Bulletin*, 103 (1), 27-43.
- PALVA S., PALVA J.M. (2007). New vistas for α -frequency band oscillations. *Trends in Neurosciences*, 30 (4), 150-158.
- PEÑA J., SAMPEDRO A., IBARRETXE-BILBAO N., ZUBIAURRE-ELORZA L., OJEDA N. (2019). Improvement in creativity after transcranial random noise stimulation (tRNS) over the left dorsolateral prefrontal cortex. *Scientific Reports*, 9 (1), 1-9.
- PFURTSCHELLER G., DA SILVA F.L. (1999). Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: Basic principles. *Clinical Neurophysiology*, 110 (11), 1842-1857.
- PFURTSCHELLER G., STANCAK JR A., NEUPER C. (1996). Event-related synchronization (ERS) in the alpha band – an electrophysiological correlate of cortical idling: A review. *International Journal of Psychophysiology*, 24 (1-2), 39-46.
- PHILLIPS V.K., TORRANCE E.P. (1977). Levels of originality at earlier and later stages of creativity test tasks. *Journal of Creative Behavior*, 11 (2), 147-147.
- RAICHLE M.E., MACLEOD A.M., SNYDER A.Z., POWERS W.J., GUSNARD D.A., SHULMAN G.L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98 (2), 676-682.
- RAZUMNIKOVA O.M. (2004). Gender differences in hemispheric organization during divergent thinking: An EEG investigation in human subjects. *Neuroscience Letters*, 362, 193-195.
- REITER-PALMON R., FORTHMANN B., BARBOT B. (2019). Scoring divergent thinking tests: A review and systematic framework. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 13 (2), 144-152.

- ROMINGER C., PAPOUSEK I., PERCHTOLD C.M., BENEDEK M., WEISS E.M., SCHWERDTFEGER A., FINK A. (2019). Creativity is associated with a characteristic U-shaped function of alpha power changes accompanied by an early increase in functional coupling. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 19 (4), 1012-1021.
- RUNCO M.A. (2004). Everyone has creative potential. In R.J. Sternberg, E.L. Grigorenko, J.L. Singer (eds.), *Creativity: From potential to realization*. Washington, D.C.: American Psychological Association, pp. 21-30.
- RUNCO M.A., ACAR S. (2012). Divergent thinking as an indicator of creative potential. *Creativity Research Journal*, 24 (1), 66-75.
- RUNCO M.A., JAEGER G.J. (2012). The standard definition of creativity. *Creativity Research Journal*, 24 (1), 92-96.
- RUNCO M.A., PRITZKER M.A., PRITZKER S.R., PRITZKER S. (eds.) (1999). *Encyclopedia of creativity* (Vol. 2). New York: Elsevier.
- SANDKÜHLER S., BHATTACHARYA J. (2008). Deconstructing insight: EEG correlates of insightful problem solving. *PLoS one*, 3 (1).
- SAWYER K. (2011). The cognitive neuroscience of creativity: A critical review. *Creativity Research Journal*, 22, 137-154.
- SCHWAB D., BENEDEK M., PAPOUSEK I., WEISS E.M., FINK A. (2014). The time-course of EEG alpha power changes in creative ideation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 310.
- SHALLEY C.E., ZHOU J., OLDDHAM G.R. (2004). The effects of personal and contextual characteristics on creativity: Where should we go from here? *Journal of Management*, 30 (6), 933-958.
- SILVIA P.J., PHILLIPS A.G. (2004). Self-awareness, self-evaluation, and creativity. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 30 (8), 1009-1017.
- SILVIA P.J., WIGERT B., REITER-PALMON R., KAUFMAN J.C. (2012). Assessing creativity with self-report scales: A review and empirical evaluation. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 6 (1), 19-34.
- SIMONTON D.K. (2003). Scientific creativity as constrained stochastic behavior: The integration of product, person, and process perspectives. *Psychological Bulletin*, 129 (4), 475-494.
- SIMONTON D.K. (2008). Creativity and genius. In O.P. John, R.W. Robins, L.A. Pervin (eds.), *Handbook of personality: Theory and research* (3rd ed.). New York: Guilford Press, pp. 679-698.
- STEIN M.I. (1953). Creativity and culture. *The Journal of Psychology*, 36 (2), 311-322.
- STERNBERG R.J., LUBART T.I. (1995). *Defying the crowd: Cultivating creativity in a culture of conformity*. New York: Free Press.
- STERNBERG R.J., LUBART T.I. (1999). The concept of creativity: Prospects and paradigms. In R. Sternberg (ed.), *Handbook of creativity*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 3-15.
- STERNBERG R.J., O'HARA L.A. (1999). *Creativity and intelligence*. In R. Sternberg (ed.), *Handbook of creativity*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 251-272.
- WALLAS G. (1926). *The art of thought*. New York: Harcourt Brace.
- WANG M., HAO N., KU Y., GRABNER R.H., FINK A. (2017). Neural correlates of serial order effect in verbal divergent thinking. *Neuropsychologia*, 99, 92-100.
- WARD T.B. (1994). Structured imagination: The role of category structure in exemplar generation. *Cognitive Psychology*, 27 (1), 1-40.

[Ricevuto il 26 giugno 2020]
 [Accettato il 5 novembre 2020]

The neuroscientific study of creative thinking: Results and methodologies in the investigation of divergent thinking

Summary. Creativity is one of the cognitive abilities that significantly differentiate humans from other animal species. For its intrinsic complexity, creative thinking has always been considered an elusive phenomenon, difficult to investigate. In recent years, however, the study of creative thinking is rapidly advancing thanks to important methodological developments, including innovative measurements for analyzing the creative behavior in combination with the use of tools that allow monitoring of brain activity. This work aims at providing an overview of recent empirical evidence on creativity in the field of neuroscientific research, focusing on a specific characteristic of the creative behavior, i.e., the divergent ability to produce potentially original and effective ideas to open-ended problems. Specifically, the main results and study methods emerging from the neuroscientific research on divergent thinking employing electroencephalography (EEG) and functional magnetic resonance imaging (fMRI) are taken into consideration. The results of this review highlight that the divergent thinking process can be rigorously examined from a neuroscientific point of view through the use of different techniques. In the conclusions, potential implications and future lines of research are discussed.

Keywords: Creativity, divergent thinking, neuroscience, EEG, fMRI.

La corrispondenza va inviata a Serena Mastria, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione «Guglielmo Marconi», Università di Bologna, Viale del Risorgimento 2, 40136 Bologna. E-mail: serena.mastria4@unibo.it