



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

Dipartimento di Psicologia

Dottorato di Ricerca in Psicologia Sperimentale, Linguistica e Neuroscienze Cognitive

XXII Ciclo

RAPPRESENTAZIONI MENTALI DELLA MUSICA:

STUDI COMPORTAMENTALI SULL'INTERAZIONE Uditivo-MOTORIA

DURANTE L'ANALISI DELL'ALTEZZA DEI SUONI

E

BRAIN IMAGING FUNZIONALE DELLA RAPPRESENTAZIONE DEL RITMO

Pietro Davide Trimarchi

Tutor: Prof. Claudio Luzzatti

Anno Accademico 2009/2010

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che direttamente o indirettamente mi hanno aiutato a concludere questo lavoro. In particolare: i Maestri B. Zanolini e M. Parovel, direttori, rispettivamente, dei conservatori G. Verdi di Milano e G. Tartini di Trieste, per avermi permesso di condurre parte dei miei esperimenti presso i loro istituti; i Maestri S. Rumi e A. Chielli (Conservatorio di Milano), e P. Polotti e M.T. Trevisan (Conservatorio di Trieste) per il prezioso aiuto nel reclutamento dei partecipanti; il Prof. L. M. Parsons per avermi dato la possibilità di partecipare alle attività di ricerca condotte presso il laboratorio di Neuroscienze Cognitive dell'Università di Sheffield.

Infine, un ringraziamento speciale a Marina, per il suo fondamentale sostegno e per ripagarla, almeno in parte, del tempo sottrattole per portare a termine questo lavoro.

Riassunto

Gli studi sperimentali descritti in questo lavoro di tesi riguardano due progetti di ricerca. Il primo ha avuto come obiettivo quello di indagare il fenomeno dell'interazione uditivo-motoria nei pianisti, in particolare rispetto all'analisi di una specifica componente qualitativa del suono: l'altezza. Nel secondo si sono studiate le basi neurali associate all'elaborazione delle diverse sottocomponenti del ritmo musicale.

Rispetto al primo progetto, vengono riportati quattro studi sperimentali. Il primo valuta la presenza di interazione uditivo-motoria nei pianisti in seguito all'ascolto di accordi di diversa altezza. I risultati mostrano che solo nei pianisti, ma non nei musicisti non pianisti e nei non-musicisti, emergono risposte più veloci per i suoni acuti rispetto ai gravi alla mano destra e risposte più veloci per i suoni gravi rispetto agli acuti alla mano sinistra. I tre successivi esperimenti costituiscono un controllo di questo effetto, in particolare per valutare se siano coinvolte anche delle rappresentazioni di natura spaziale. Il secondo esperimento valuta la dinamica temporale dell'effetto con lo scopo di indagare se questa segue un andamento caratteristico. I risultati mostrano che l'effetto di associazione tra altezza del suono e risposta manuale rimane stabile entro una finestra temporale di 400 ms. Questo lo rende piuttosto diverso da effetti di associazione stimolo-risposta ampiamente studiati quali ad es. l'effetto Simon. Tale evidenza ci ha permesso di fare alcune inferenze riguardo la natura di questo effetto e il livello di elaborazione a cui avviene. Il terzo esperimento valuta se nell'emergere dell'effetto è implicata l'attivazione di una rappresentazione di natura spaziale. Abbiamo proposto ai partecipanti lo stesso compito usato nei primi due esperimenti modificando la modalità di risposta, che veniva data con le mani incrociate. Con questa manipolazione l'effetto di associazione scompare e questo risultato ci ha fatto ipotizzare la possibile presenza di una doppia rappresentazione dell'altezza dei suoni nei pianisti: una di natura motoria e una di tipo spaziale. Il quarto esperimento ha lo scopo di indagare l'ipotesi emersa dai risultati del terzo studio, ossia che nella rappresentazione dell'altezza dei suoni nei pianisti sia coinvolta tanto una componente motoria quanto una spaziale. A questo scopo abbiamo sottoposto un gruppo di pianisti alla stessa condizione sperimentale usata nei primi tre esperimenti con l'unica differenza che questa volta i partecipanti rispondevano premendo dei pedali. I risultati mostrano che l'effetto di associazione emerso nei primi due esperimenti viene replicato, suggerendo il coinvolgimento di rappresentazioni di natura spaziale.

Rispetto al secondo progetto, viene riportato uno studio di brain imaging funzionale (PET) in cui sono state indagate le basi neurali associate all'elaborazione delle diverse sottocomponenti del ritmo

musicale (Pattern ritmico, Metro e Tempo). Per valutare il ruolo dell'expertise musicale abbiamo studiato due gruppi di soggetti: Musicisti e Non-Musicisti. I risultati mostrano che l'analisi selettiva di ogni sotto-componente del ritmo musicale (Pattern, Metro e Tempo) si associa a diversi pattern di attivazione neurale, suggerendo la presenza di circuiti di elaborazione diversi. In particolare, l'elaborazione del Metro sembra coinvolgere aree associate a funzioni di livello cognitivo superiore, astratto e multi-modale (visivo-uditivo), l'elaborazione del Pattern attiva un set di aree correlate all'analisi di informazioni uditive ed emotive mentre l'elaborazione del Tempo è correlata a una maggiore attivazione di aree coinvolte in aspetti somatosensoriali, pre-motori ed emotivi. Inoltre, globalmente i musicisti sembrano reclutare rappresentazioni di alto livello situate nei lobi temporale, frontale e occipitale, mentre i non-musicisti reclutano maggiormente aree senso-motorie, sottocorticali e cerebellari.

Abstract

The experimental studies presented in this thesis concern two different research projects. The first one aimed to study the auditory-motor interaction in pianists with respect to the pitch-height processing. The second one aimed to study the neural underpinnings of musical rhythm subcomponents (Pattern, Meter and Tempo) processing.

The auditory-motor interaction in pianists during pitch-height processing has been investigated by means of four behavioral experiments. In the first one, three groups of participants (pianists, non-pianist musicians and non-musicians) were tested with a shape decision task where left-hand and right-hand responses were required; each visual stimulus was paired with an auditory task-irrelevant stimulus (high-pitched or low-pitched piano-timbre chords). Of the three groups, only pianists had longer reaction times for left-hand/high-pitched chords and right-hand/low-pitched chords associations. These findings are consistent with an auditory-motor interaction effect elicited by pitch dimension, as only pianists show an interaction between motor responses and implicit pitch processing. This interaction is consistent with the canonical mapping of hand gestures and pitch dimension on the piano keyboard. The second experiment was aimed to study the temporal dynamic of the emerged effect. We used the same experimental procedure of the Experiment 1, varying only the Stimulus Onset Asynchrony between the auditory and visual stimuli. The results shown that the effect was stable within a time-window of 0-400 ms. The aim of the third experiment was to study whether a spatial representation was involved in the effect emerged in Experiment 1. The same experimental task used in Experiment 1 was proposed to a fresh group of pianists, with the only

difference that participants responded with their hands crossed. Using this manipulation the effect of association disappeared, suggesting that motor and spatial representation are involved at the same time. The fourth experiment was aimed to confirm the hypothesis that a spatial representation was involved in the effect emerged in Experiment 1. A fresh group of pianists was tested with the same task of Experiment 1 with the only difference that participants responded by pressing two pedals with their feet. The results replicate those of Experiment 1 and are consistent with the involvement of spatial representations.

The second project was aimed to study the brain basis of musical rhythm perception. The temporal organisation of music is composed of distinct independent features such as Pattern, Meter and Tempo, and each feature has a different computational processing, likely requiring different neural mechanisms. Nonetheless, there is a lack of clear evidence at present to assess such differences. To this aim, the present study compared the neural basis of the perception of these rhythmic features. The functional brain activity of healthy musicians and non-musicians was recorded with positron emission tomography (PET) as they made covert same-different discriminations of pairs of rhythmic, monotonic musical sequences, or pairs of isochronous melodies. Brain activity observed here suggests that meter processing recruits a more cognitive, abstract, multi-modal (visual-auditory) set of mechanisms, than does processing pattern or tempo. Pattern processing recruits a set of mechanisms involved in auditory and emotion information, and tempo processing engages mechanisms subserving somatosensory, premotor, and emotion information. Moreover, musicians seem to recruit higher level representations in temporal, occipital, and frontal areas, whereas non-musicians use more sensory-motor, basal ganglia (putamen, caudate), and cerebellar mechanisms.

Lista delle abbreviazioni

AM: Analizzatore motorio
BA: Brodmann's area
BOLD: Blood Oxygen Level Dependence
CDB: Cortico Basal Degeneration
EC: Event Code
ECI: Engrammi cinestesico-innervatori
ERPs: Event Related Potentials
FC: Feature Code
fMRI: Functional Magnetic Resonance Imaging
ICF: Intracortical Facilitation
M1: Corteccia motoria primaria
MEG: Magnetoencephalography
MEP: Motor Evoked Potential
PET: Positron Emission Tomography
PSP: Progressive Supranuclear Palsy
RapA-E: Rappresentazione Azione-Effetto
RC: Recruitment Curve
rCBF: Regional Cortical Blood Flow
RT: Reaction Time
RTd: Reaction Time differences
SMARC: Spatial Musical Association of Response Code
SNARC: Spatial Numerical Association of Response Code
SoA: Stimulus Onset Asynchrony
SRC: Stimulus Response Compatibility
TCC: Teoria del Codice Comune
TEC: Theory of Event Coding
TMS: Transcranial Magnetic Stimulation
TR: Tempi di Reazione
TTM: Transformative Technology of Mind Theory

Sommario

Ringraziamenti	i
Riassunto	ii
Abstract	iii
Lista delle abbreviazioni.....	v
Sommario	vi
1 Origine della musica.....	1
1.1 Ipotesi adattative sull'origine della musica	2
1.2 Ipotesi non adattative sull'origine della musica	5
1.3 La Transformative Technology of Mind Theory di Patel.....	6
1.4 Considerazioni conclusive.....	8
2 Modularità delle funzioni cognitive e mente musicale.....	9
2.1 Il concetto di Modularità in psicologia cognitiva.....	9
2.2 Modularità nell'elaborazione della musica.....	11
2.2.1 Modularità nei processi di percezione della musica	13
2.2.2 Modularità nei processi di produzione musicale	17
2.3 L'ascolto esperto	18
3 L'interazione uditivo-motoria.....	22
3.1 Il rapporto tra percezione e azione	22
3.2 L'interazione uditivo-motoria: una definizione.....	25
3.3 Rappresentazione delle azioni e interazione uditivo-motoria.....	26
3.3.1 Il principio ideomotorio.....	26
3.3.2 I neuroni specchio.....	28
3.3.3 I neuroni specchio uditivi	32
3.4 Interazioni uditivo-motorie: evidenze empiriche nell'essere umano.....	33
3.5 Interazioni uditivo-motorie nella musica.....	39
4 Una teoria cognitiva per l'interazione uditivo-motoria: la Theory of Event Coding (TEC)	49

4.1	Feature Code.....	49
4.2	Event Code	52
4.3	TEC e interazioni uditivo-motorie.....	54
5	Introduzione alla parte sperimentale.....	57
5.1	L'elaborazione dell'altezza del suono nei pianisti: interazione uditivo-motoria e possibili componenti spaziali	57
5.2	L'elaborazione del ritmo musicale: basi neurali delle diverse sottocomponendi del ritmo	63
6	L'elaborazione dell'altezza del suono nei pianisti: il ruolo dell'interazione uditivo-motoria e spaziale	69
6.1	Implicit chord processing and motor representation in pianists (Esperimento 1)	69
6.1.1	Premessa	69
6.1.2	Introduction	72
6.1.3	Method.....	75
6.1.4	Results	79
6.1.5	Discussion.....	83
6.2	Dinamica temporale dell'effetto di interazione uditivo-motoria mediato dall'altezza del suono (Esperimento 2)	87
6.2.1	Introduzione.....	87
6.2.2	Materiali e Metodi	88
6.2.3	Risultati.....	91
6.2.4	Discussione.....	94
6.3	Interazione uditivo-motoria e rappresentazioni spaziali nell'elaborazione dell'altezza del suono da parte di pianisti (Esperimento 3)	97
6.3.1	Introduzione.....	97
6.3.2	Materiali e Metodi	99
6.3.3	Risultati.....	103
6.3.4	Discussione.....	103
6.4	Interazione uditivo-motoria e rappresentazioni spaziali nell'elaborazione dell'altezza del suono da parte di pianisti (Esperimento 4)	106
6.4.1	Introduzione.....	106
6.4.2	Materiali e Metodi	107

6.4.3	Risultati.....	109
6.4.4	Discussione.....	111
6.5	Discussione generale	114
7	Basi neurali dell'elaborazione delle diverse sottocomponenti del ritmo musicale.....	118
7.1	Introduzione.....	118
7.2	Materiali e Metodi	122
7.3	Risultati.....	125
7.4	Discussione.....	138
7.5	Conclusioni.....	148
	Bibliografia.....	150
	Appendice.....	174

1 Origine della musica

L'attività musicale è presente in tutti i popoli della terra, non esiste infatti società, cultura o popolazione tribale che non possieda una qualche forma di musica tradizionale (Nettl, 2000). La capillare diffusione delle pratiche musicali si unisce a un'origine antichissima, come dimostrano recenti indagini archeologiche che hanno individuato flauti d'osso databili al Pleistocene superiore (circa 40.000 anni fa, Conard e coll., 2009). Questi elementi, insieme, sembrerebbero suggerire una qualche forma di legame tra l'evoluzione dell'essere umano e la presenza della musica nel suo repertorio comportamentale. Riguardo il problema dell'origine della musica sono presenti, attualmente, tre principali ipotesi esplicative: una "Adattativa", una "Non-adattativa" e un'ultima basata sul principio di Evoluzione Culturale. La posizione Adattativa sostiene che le nostre abilità musicali siano state un target diretto dei processi di selezione naturale e dunque che la musica abbia avuto un qualche ruolo adattativo per i nostri progenitori (Cfr. Mithen, 2005 per una monografia sull'argomento). La posizione Non-adattativa ritiene invece che la musica non sia altro che un "sottoprodotto" di abilità cognitive deputate ad altre funzioni mentali (Pinker, 1997), dunque che l'evoluzione non abbia avuto alcun ruolo specifico nella selezione e nello sviluppo delle capacità musicali umane. La terza posizione, basata sul principio di Evoluzione Culturale, è stata recentemente proposta da Aniruddh Patel (2008; 2010) e concepisce la musica come una tecnologia di invenzione umana che permette di modificare la mente (Transformative Technology of Mind Theory, TTM). Nei successivi paragrafi presenterò brevemente queste tre posizioni, definendone le caratteristiche principali.

1.1 Ipotesi adattative sull'origine della musica

Le aree di indagine nelle quali si sono cercate evidenze a favore di un ruolo della selezione naturale nell'origine della musica sono principalmente tre: la selezione sessuale, lo sviluppo mentale e la coesione sociale. Riguardo i meccanismi di selezione sessuale, Miller (2000) sostiene che le condotte musicali dei nostri progenitori hanno avuto un ruolo nell'assicurarsi i migliori partner, incidendo così positivamente sul successo evolutivo. Un principio alla base di questa ipotesi è che il comportamento musicale sia preminente nei maschi durante la fase di corteggiamento, elemento ampiamente confermato per quanto riguarda altre specie animali che hanno comportamenti "musicali", quali ad esempio gli uccelli, le balene o alcuni insetti (Birkhead, 2008). Come prove a favore di questa ipotesi l'autore sostiene che negli esseri umani vi sia un'esplosione dell'interesse per la musica durante la fase adolescenziale e che il coinvolgimento in attività musicali diverse dalla semplice fruizione passiva (es. formazione di band musicali) presenti una frequenza significativamente maggiore negli individui di sesso maschile. Questa ipotesi presenta numerosi punti di fragilità. Il più rilevante riguarda l'ipotizzata differenza tra maschi e femmine riguardo i comportamenti musicali attivi. Mentre in specie inferiori come gli uccelli canori esistono marcate differenze anatomiche e comportamentali tra maschi e femmine che possono rendere conto del fatto che i comportamenti musicali attivi (produzioni canore) sono appannaggio dei maschi ed hanno un preciso ruolo nel corteggiamento, nulla di tutto questo è presente negli esseri umani (Huron, 2000). Va inoltre rilevato che il ruolo della musica nelle varie culture è ben più ampio di quello che gli attribuisce Miller, infatti la presenza della musica è pressoché universale in contesti di tipo rituale, curativo, ricreativo, bellico (Cross, 2000). Infine, l'autore non considera l'ipotesi che l'esplosione dell'interesse per la musica durante l'adolescenza possa essere spiegata anche da una serie di fattori culturali legati al processo di formazione dell'identità (Denora, 2001).

Un'idea piuttosto diversa riguardo il ruolo adattativo che avrebbe giocato la musica per i nostri progenitori viene proposta da Ian Cross (2000), il quale sostiene che la musica sia fondamentale per

un efficiente sviluppo mentale, e in particolare permetta di esercitare e integrare tra loro una varietà di funzioni cognitive e motorie, fornendo inoltre un utile banco di prova per l'esplorazione del comportamento sociale. In altre parole, l'ipotesi di Cross è che il comportamento musicale, assicurando un più efficiente sviluppo delle facoltà cognitive e sociali, abbia promosso una maggiore flessibilità cognitiva e un maggiore comportamento pro-sociale nei nostri progenitori, favorendone così il successo evolutivo. L'idea proposta da Cross appare molto interessante e sono presenti in letteratura alcune evidenze empiriche che sembrano suffragarla. L'analisi della letteratura ci offre innumerevoli prove del fatto che l'ascolto della musica migliora la prestazione in prove cognitive eseguite durante o pochi minuti dopo l'ascolto (Cfr. Schelleberg, 2005 per una rassegna su questo argomento). Ulteriori dati dimostrano in modo chiaro che un effetto ancora più importante e, solo in questo caso, duraturo nel tempo è presente in quei soggetti che apprendono a suonare uno strumento musicale (Schelleberg, 2005; Hannon e Trainor, 2007). Non mancano, tuttavia, elementi che portano a dubitare delle conclusioni di Cross. Infatti, se la musica fosse un elemento fondamentale per un pieno sviluppo mentale e sociale, ci aspetteremmo che soggetti con deficit congeniti che riguardano l'elaborazione della musica presentino particolari difficoltà nel pieno sviluppo delle proprie facoltà mentali e sociali. Soggetti con Amusia congenita sono stati ampiamente descritti in letteratura ed è stato stimato che tale condizione colpisce circa il 4% della popolazione (Peretz e Hyde, 2003). Il deficit, di natura genetica (Drayna e coll., 2001), si manifesta con una marcata difficoltà nella corretta percezione dell'altezza dei suoni, tanto che un soggetto con tale disturbo non è in grado di riconoscere una breve melodia anche dopo più volte che l'ha ascoltata o di rilevare la presenza di note stonate all'interno di un brano musicale (Ayotte e coll., 2002). Allo stato attuale non esistono evidenze sperimentali riguardo a eventuali limitazioni nello sviluppo cognitivo o sociale di questi soggetti. Descrizioni aneddotiche permettono inoltre di constatare come persone con amusia congenita possano raggiungere eccellenti risultati dal punto di vista intellettuale o sociale (l'economista premio Nobel Milton Friedman e il rivoluzionario Latino-Americano Che Guevara ne sono un esempio).

L'ultima ipotesi che prendo in considerazione riguarda il ruolo della musica nel promuovere la coesione sociale all'interno di un gruppo. Secondo tale posizione, la musica avrebbe permesso di cementare i legami sociali attraverso l'uso che se ne faceva in contesti rituali e per il fatto che fosse prevalentemente una pratica di gruppo. Prove a favore di questa ipotesi arrivano da più ambiti di ricerca. Dal punto di vista antropologico è stato evidenziato che presso le popolazioni tribali attualmente presenti sulla terra la musica è effettivamente usata quasi esclusivamente in attività di natura sociale (Morley, 2003). Inoltre l'attività musicale di gruppo sembra essere un potente regolatore dell'umore in quanto permette ai partecipanti di condividere gli stati emotivi sperimentati, favorendo così il senso di appartenenza (Sloboda e O'Neill, 2001).

Una variante dell'ipotesi basata sulla coesione sociale è quella proposta dalla Trehub (2000) secondo cui la musica ha avuto un ruolo fondamentale nella relazione madre-bambino. Secondo la Trehub il canto è stato un potente strumento che ha permesso alle nostre progenitrici di accudire la prole anche in assenza di un contatto fisico diretto, favorendo così le attività di ricerca del cibo. Le sue argomentazioni si basano su tre evidenze fondamentali. La prima emerge da un ampio studio sulle "ninne nanne" che ha evidenziato come le caratteristiche strutturali di questo tipo di musica sono pressoché identiche in ogni cultura. Una struttura semplice e contorni melodici prevalentemente discendenti sembrano accomunare la gran parte delle ninne nanne. Tali caratteristiche promuoverebbero un effetto calmante sul bambino (Trehub e Trainor 1998). Una seconda evidenza mostra che all'età di sei mesi i bambini vengono maggiormente attratti dal sentire la madre che canta loro qualcosa rispetto al sentirla mentre parla con loro (Nakata e Trehub, 2004). Infine, è stato dimostrato che i livelli di cortisolo presenti nella saliva dei bambini, un parametro che permette di stabilire il grado di arousal, diminuiscono e rimangono bassi più a lungo dopo che il bambino ha ascoltato il canto della propria madre rispetto alla condizione in cui ha ascoltato la propria madre che gli parla (Shenfield e coll., 2003). Queste evidenze costituiscono una

prova piuttosto convincente, seppure indiretta, dell'ipotesi evolutiva avanzata dalla Trehub, che rimane, tra quelle proposte, quella meglio sviluppata e meglio corroborata dalle prove sperimentali.

1.2 Ipotesi non adattative sull'origine della musica

In forte contrasto rispetto alle teorie adattative sull'origine della musica, le ipotesi non adattative sostengono che la selezione naturale non abbia avuto alcun ruolo nell'origine ed evoluzione delle nostre competenze musicali. William James, nei suoi *Principi di psicologia*, fu uno dei primi autori ad avanzare questa ipotesi (James 1890). Egli sostiene che il piacere tratto dall'ascolto della musica è un mero fatto incidentale legato al possedere un "organo dell'udito".

Una più recente ipotesi maggiormente strutturata è quella di Steven Pinker (1997). Il principio di base su cui si fonda la sua posizione è che la musica sia un'invenzione umana che ha il solo scopo di produrre sensazioni piacevoli. Il legame tra musica e piacere costituisce, secondo Pinker, la ragione per cui la musica è una pratica universalmente diffusa. Ma perché la musica produce sensazioni piacevoli? La risposta che Pinker offre a questa domanda è che la musica stimola una serie di funzioni mentali di base che non hanno direttamente a che fare con la musica ma che sono state, e sono, fondamentali per l'evoluzione dell'uomo. Più specificamente, la musica ha delle proprietà molto simili a quelle della prosodia linguistica (pattern specifici di intonazione e ritmo), ed essendo la prosodia una componente fondamentale del linguaggio, il nostro cervello attribuisce un peso rilevante a stimoli con caratteristiche simil-prosodiche. In secondo luogo, la musica sfrutta sequenze di suoni che hanno, tra di loro, rapporti armonici, e dal momento che l'armonicità di un suono è un importante cue usato dal sistema uditivo nei processi di analisi della scena uditiva, ad esempio per identificare la fonte di un suono, il possedere caratteristiche di armonicità rende gli stimoli uditivi molto "interessanti" per il nostro cervello. Inoltre la musica può evocare forti emozioni perché contiene pattern melodico-ritmici simili alle produzioni vocali emotive non linguistiche tipiche della nostra specie (ad esempio il riso o il pianto). Un ulteriore aspetto che rende la musica saliente per il nostro cervello, sempre secondo Pinker, è dovuta al fatto che i pattern

melodici che la caratterizzano evocano suoni ambientali rilevanti dal punto di vista della sicurezza (ad esempio suoni “sicuri” o “insicuri” come il tuono, il vento, ecc.). Infine, il ritmo musicale suscita un movimento ritmico del corpo (come nella danza) e questo tipo di movimenti sono “apprezzati” dal nostro cervello perché associati a comportamenti ritmici biologicamente rilevanti come il camminare, il correre o il respirare. Sulla base di questi elementi l’autore ritiene che non sia esistita nessuna selezione naturale che abbia interessato delle capacità di natura prettamente musicale, concludendo che la musica non ha avuto e non ha alcuna rilevanza biologica per la nostra specie.

1.3 La Transformative Technology of Mind Theory di Patel

Le due posizioni viste finora possono essere considerate in contrapposizione tra loro. Infatti, mentre la prima considera le nostre capacità musicali come una caratteristica selezionata dal processo evolutivo, e dunque utile alla nostra sopravvivenza (almeno in termini di evoluzione della specie), la seconda non attribuisce alcun vantaggio biologico legato al possedere delle facoltà musicali. Una terza opzione volta a superare l’aut-aut imposto dalle ipotesi precedenti è stata recentemente proposta da Aniruddh Patel (2010). L’autore sostiene che la musica sia una tecnologia di invenzione umana capace di agire sul nostro cervello in modo trasformativo (Transformative Technology of Mind Theory). Alla base di questa proposta ci sono due aspetti fondamentali: in primo luogo il comportamento musicale non sarebbe un tratto selezionato per via evolutiva; in secondo luogo la musica avrebbe degli effetti positivi e duraturi su una serie di facoltà non musicali (ad esempio il linguaggio, l’attenzione e le funzioni esecutive) e dunque sarebbe rilevante dal punto di vista biologico per gli esseri umani. L’ipotesi di Patel condivide dunque con le posizioni non adattative l’idea che il comportamento musicale non sia un tratto evolutivamente selezionato perché vantaggioso. Tuttavia, attribuisce a questo tipo di comportamento un notevole potenziale dal punto di vista biologico a livello del singolo individuo, aspetto che spiegherebbe il perché dell’antichissima origine e dell’universale diffusione della musica. Vista in questi termini la musica può essere

annoverata insieme ad altre tecnologie di invenzione umana come la lettura e la scrittura, “strumenti” che una volta appresi modificano il modo di funzionare del nostro cervello. Nessuno sosterebbe che il nostro cervello sia stato evolutivamente selezionato per leggere e scrivere, tuttavia molteplici studi hanno rilevato la presenza di specifici meccanismi mentali, supportati da basi neurali chiaramente definite, che intervengono questo tipo di comportamento (Dehaene, 2009).

Gli elementi che portano Patel a sostenere che le capacità musicali non siano un tratto evolutivamente selezionato provengono da una serie di ricerche nell’ambito delle capacità di elaborazione della melodia e del ritmo che dimostrano come questi processi di elaborazione si fondino su competenze preposte all’elaborazione del linguaggio (Patel, 2008; 2010). Non esisterebbero dunque dei processi modulari dominio-specifici per la musica, ma delle capacità sviluppate per un altro scopo, il linguaggio, che grazie alle loro peculiarità funzionali si prestano all’elaborazione dei segnali musicali. L’altro aspetto fondamentale della teoria di Patel, ossia la rilevanza della musica dal punto di vista biologico a livello del singolo individuo, viene supportato attraverso due esempi clinici. Il primo riguarda pazienti che hanno subito un danno cerebrale conseguente a ictus. È stato dimostrato che in pazienti di questo tipo l’ascolto regolare di una musica di proprio gusto può aiutare il recupero di alcune funzioni cognitive (memoria verbale e attenzione selettiva) e migliorare il tono dell’umore (Särkämö e coll., 2008). Si suppone che tale effetto possa essere mediato da fattori neuroendocrini (Patel, 2010). Il secondo riguarda pazienti che a causa di lesioni cerebrali presentano deficit di linguaggio. Alcune ricerche mostrano che in pazienti con afasia non fluente un tipo di terapia che sfrutta brevi pattern melodici (Melodic intonation therapy, Albert e coll., 1973) sembra facilitare il recupero delle capacità di fluenza. Gli effetti positivi sembrerebbero dipendere da uno shift delle funzioni linguistiche dall’emisfero sinistro all’emisfero destro (Schlaug e coll., 2008, 2009).

Le evidenze sperimentali proposte da Patel suggeriscono dunque che il comportamento musicale (tanto l’ascoltare quanto il fare musica) pur non essendo un tratto selezionato per via evolutiva può

avere degli effetti a lungo termine su funzioni cerebrali non direttamente coinvolte nell'elaborazione della musica, effetti che sono biologicamente rilevanti nella vita di un individuo. Sulla base di questa conclusione, l'autore sostiene che il comportamento musicale possa essere considerato una sorta di Exaptation (Gould e Vrna, 1982), ossia un carattere non direttamente modellato dalla selezione naturale per un determinato scopo ma tuttavia in grado di aumentare le capacità di sopravvivenza dell'essere umano.

1.4 Considerazioni conclusive

Le ipotesi illustrate presentano un diverso livello di validazione sperimentale. La posizione meglio documentata è quella adattativa, seguita dalla Transformative Technology of Mind Theory (TTM). Del tutto indirette sono invece le osservazioni poste a sostegno delle ipotesi non adattative. Questo diverso grado di validazione sperimentale porta a dare maggiore credito alle ipotesi adattative, le quali, allo stato attuale, risultano quelle più convincenti e meglio strutturate.

2 Modularità delle funzioni cognitive e mente musicale

2.1 Il concetto di Modularità in psicologia cognitiva

Il concetto di *Modularità*, delineato dal filosofo statunitense Jerry Fodor (1983), si riferisce a un'ipotesi riguardo la strutturazione funzionale di alcune porzioni del sistema cognitivo. Secondo tale approccio le informazioni in entrata sarebbero elaborate da specifiche componenti, i moduli appunto, che si occupano di trasformarle in rappresentazioni da inviare ai processi di elaborazione centrale del sistema cognitivo. Questa strutturazione interesserebbe solo i sistemi di elaborazione precoce, i sistemi centrali perderebbero, secondo Fodor, il funzionamento di tipo modulare. I diversi moduli che compongono le unità di input condividono una serie di caratteristiche:

- Sono dominio specifici, ossia altamente specializzati (elaborano solo un certo tipo di input).
- Hanno un funzionamento obbligato, ossia una volta esposti all'input specifico che analizzano entrano in azione automaticamente.
- C'è solo un accesso centrale limitato per le rappresentazioni che computano, ossia i vari livelli di analisi che li caratterizzano non sono accessibili da parte della coscienza.
- Possiedono una notevole velocità di funzionamento.
- Sono incapsulati informazionalmente, ossia sul loro funzionamento non agiscono altri tipi di conoscenze, o variabili, se non quelle contenute nel modulo stesso.
- Sono specificati in modo innato.
- Non presentano ulteriori sotto-componenti modulari.

Tale paradigma ha ottenuto un notevole successo soprattutto in neuropsicologia, infatti l'osservazione di fenomeni interpretabili con il concetto di modularità costituisce un dato costante nelle ricerche di questa disciplina. In particolare, la neuropsicologia cognitiva ha fornito i più forti sostegni sperimentali al concetto di modularità funzionale di molte funzioni cognitive quali, ad

esempio, il riconoscimento di oggetti o le capacità di lettura (Cfr. Rapp, 2001).

Come ha chiaramente sottolineato Coltheart (1999; 2001) le caratteristiche sopra elencate non devono necessariamente essere tutte presenti per poter parlare di modularità. Esistono, infatti, sistemi modulari le cui componenti non sono certo specificate in modo innato, come ad esempio le capacità di lettura (Coltheart, 2001). La nozione di modularità ammetterebbe dunque, come aveva peraltro già chiarito lo stesso Fodor (1983, p. 37), una certa gradualità, esisterebbero dunque sistemi modulari che presentano la gran parte delle caratteristiche sopra menzionate e sistemi che ne presentano solo alcune. Ma quali sono allora le caratteristiche essenziali che ci permettono di applicare a un sistema la nozione di modularità? Secondo Coltheart il fatto di essere dominio-specifico è l'unica condizione necessaria perché a un sistema cognitivo si possa applicare il termine "modulare". Nella sua accezione, dunque, un modulo è un meccanismo dominio-specifico di elaborazione dell'informazione. Questa definizione di modularità è sicuramente più adatta a interpretare una serie di fenomeni che normalmente si osservano in neuropsicologia cognitiva, come ad esempio la presenza di pazienti con deficit semantici che interessano selettivamente alcuni aspetti delle qualità percettive degli oggetti (ad esempio quelle visive nel paziente AC di Coltheart e coll., 1998). Da questo tipo di fenomeni si può dedurre che i sistemi centrali, come si presume che siano quelli relativi alla semantica, sembrerebbero essere modularizzati, e sembrerebbero altresì composti a loro volta da sottocomponenti modulari. Entrambe queste caratteristiche non sono compatibili con un'interpretazione rigida del concetto di modularità proposto da Fodor. Appare dunque evidente che una maggiore flessibilità e, soprattutto, un costante confronto con le evidenze sperimentali costituiscono l'approccio più adeguato per sfruttare al meglio il concetto di modularità nell'ambito delle scienze cognitive.

Uno strumento chiave per testare l'ipotesi di modularità delle funzioni cognitive è costituito dal concetto di doppia dissociazione. Esso fa riferimento al concetto di dissociazione tra sintomi. Si ha dissociazione tra sintomi (o dissociazione semplice) quando un paziente con lesione cerebrale

esegue bene un compito A e male un compito B. Questo quadro potrebbe suggerire l'indipendenza tra le funzioni cognitive coinvolte nei due compiti. Tuttavia, un pattern simile potrebbe emergere semplicemente perché il compito A è più semplice del compito B, ed essere dunque espressione di un deficit di risorsa più che di indipendenza tra funzioni cognitive. Per ovviare a tale problema interpretativo è stato delineato il concetto di doppia dissociazione (Shallice, 1988). Esso prevede che ci siano due pazienti (o gruppi di pazienti), e non solo uno, e che la prestazione ai compiti A e B sia così strutturata: uno dei pazienti presenta una prestazione normale al compito A e deficitaria al compito B mentre l'altro paziente presenta il pattern di prestazione opposta, ossia deficit al compito A e prestazione normale al compito B. In questo scenario non è più possibile invocare la difficoltà del compito per spiegare il pattern di prestazione dei due pazienti, infatti entrambe i pazienti presentano una lesione cerebrale e dunque una riduzione delle risorse a loro disposizione. Questo ci porta a ipotizzare che esistano due moduli cognitivi separati che permettono di eseguire i compiti A e B.

2.2 Modularità nell'elaborazione della musica

Il concetto di modularità è stato recentemente applicato anche allo studio delle capacità musicali. Alcune ricerche condotte su soggetti con deficit selettivi per l'elaborazione della musica hanno permesso di evidenziare l'esistenza di una struttura modulare delle funzioni mentali che si occupano di analizzare le diverse componenti strutturali di uno stimolo musicale (Peretz e Coltheart, 2003). Il percorso che ha condotto a questo risultato è partito dalla dimostrazione che i processi di analisi della musica sono indipendenti dalle capacità di analisi del linguaggio e dalle abilità coinvolte nell'elaborazione di stimoli sonori non musicali. La tabella 2.1 riporta sinteticamente i risultati di alcuni studi di casi singoli in cui il paziente indagato presentava un disturbo agnosico uditivo che interessava selettivamente il riconoscimento e l'identificazione di parole. In tre di questi casi la compromissione riguardava anche il riconoscimento e l'identificazione di suoni ambientali familiari. L'aspetto cruciale della prestazione di questi pazienti è che nessuno aveva un deficit

all'ascolto di melodie note. Questi dati vanno incrociati con ulteriori studi condotti su pazienti che manifestavano il deficit opposto, ossia una compromissione selettiva delle capacità di riconoscimento e identificazione di melodie note in assenza di difficoltà con stimoli linguistici o con suoni familiari non musicali. La tabella 2.2 riporta alcuni di questi casi. Il quadro complessivo che si delinea è quello di una doppia dissociazione tra analisi uditiva del linguaggio e analisi uditiva della musica. La presenza di questa doppia dissociazione suggerisce l'indipendenza funzionale dei sistemi che si occupano di elaborare questi due tipi di stimoli.

Reports	Stimoli uditivi		
	Melodie	Parole	Suoni ambientali familiari
1 caso ¹	+	-	+
1 caso, durante recupero funzionale ²	+	-	+
N. S. ³	+	-	+
G. L. ⁴	+	-	-
1 caso ⁵	+	-	-
1 caso ⁶	+	-	-

+ Normale; - Compromesso

Tabella 2.1. Pazienti con deficit di natura linguistica ma con preservate abilità di elaborazione della musica. ¹Laignel-Lavastine e Alajouanine, 1921; ²Godefroy e coll., 1995; ³Mendez, 2001; ⁴Metz-Lutz e Dahl, 1984; ⁵Takahashi e coll., 1992; ⁶Yaqub e coll., 1988. (Adattata da Peretz e Coltheart, 2003).

Reports	Stimoli uditivi		
	Melodie	Parole	Suoni ambientali familiari
C. N. e G. L. ¹	-	+	+ (+ voci)
I. R. ²	-	+	+
H. V. ³	-	+	+
11 casi di Amusia congenita ⁴	-	+	+ (+ voci)

+ Normale; - Compromesso

Tabella 2.2. Pazienti con deficit nell'elaborazione della musica ma con preservate abilità di elaborazione del linguaggio. ¹Peretz e coll., 1994; ²Peretz e coll., 1997; ³Griffiths e coll., 1997; ⁴Ayotte e coll., 2002. (Adattata da Peretz e Coltheart, 2003).

L'accurata analisi della prestazione di pazienti con deficit selettivi nell'elaborazione di stimoli musicali ha permesso di raffinare ulteriormente la comprensione dei meccanismi che si occupano di

analizzare i vari aspetti di cui la musica è composta (melodia, armonia e ritmo). Nel paragrafo successivo riporterò brevemente le evidenze sperimentali che hanno permesso di definire meglio la struttura multicomponentiale che caratterizza le capacità mentali di analisi della musica.

2.2.1 Modularità nei processi di percezione della musica

Una prima divisione modulare dei processi di elaborazione della musica è quella tra analisi dell'altezza dei suoni e analisi del ritmo. Questi due sottosistemi, indipendenti tra loro, lavorano in parallelo per estrarre dall'input uditivo le caratteristiche melodiche e temporali (Peretz e Coltheart, 2003). La realtà psicologica di questa suddivisione è dimostrata dalla presenza di pazienti che presentano selettivi deficit dell'analisi melodica in assenza di difficoltà nell'elaborazione delle diverse componenti ritmiche e da pazienti con un profilo di prestazione opposto (Peretz e Kolinsky, 1993; Peretz e coll., 1994; Liégeois-Chauvel e coll., 1998; Di Pietro e coll., 2004).

Tanto la melodia quanto il ritmo di un brano musicale possiedono però diverse caratteristiche strutturali. Infatti, un sistema di analisi melodica deve essere in grado di valutare non solo la presenza di suoni di altezza diversa ma anche l'andamento, ascendente o discendente, di una serie di suoni nonché i rapporti gerarchici che esistono tra i diversi suoni di una melodia. Quest'ultimo aspetto è di cruciale importanza nell'ascolto della musica. Infatti, mentre l'andamento ascendente o discendente di una sequenza di suoni, il *contorno melodico* in termini tecnici, è una caratteristica che può essere presente anche in stimoli uditivi non musicali, si pensi all'andamento crescente del contorno melodico di una frase pronunciata con tono interrogativo, l'esistenza di rapporti gerarchici tra i suoni di una melodia, o *rapporti tonali*, è invece una caratteristica squisitamente musicale ed ha attinenza con quelle sensazioni di tensione e distensione che avvertiamo all'ascolto di una musica. I principi che governano la creazione di questi diversi gradi di tensione melodica sono la base del

processo compositivo¹. Similmente, una corretta analisi degli aspetti temporali di una melodia deve essere in grado di cogliere le differenze nella durata dei singoli suoni che la compongono, componente propriamente ritmica, e l'organizzazione metrica, ossia quella qualità dell'organizzazione temporale dei suoni che ci permette di distinguere un valzer da una marcia.

Una definizione sufficientemente chiara delle diverse componenti modulari coinvolte nell'elaborazione della musica è stata proposta da Peretz e Coltheart (2003). La figura 2.1 presenta il modello da loro ipotizzato. La costruzione di tale modello si basa sulle evidenze neuropsicologiche relative a pazienti con deficit selettivi di elaborazione della musica.

Il modello prevede una prima tappa di analisi acustica aspecifica. A questo livello tutti gli stimoli uditivi percepiti dall'ambiente vengono segregati in termini di fonti sonore distinte (es. linguaggio, musica, ecc.). L'output di questo primo livello di analisi è costituito da rappresentazioni che, a seconda della loro natura, verranno elaborate, ad esempio, da moduli musicali o da moduli linguistici. Secondo gli autori non esisterebbe alcun dispositivo che si occupa di smistare le informazioni in entrata a seconda delle loro caratteristiche qualitative, ma più semplicemente, vista la natura modulare dei dispositivi coinvolti a valle, lo stream di informazioni passerebbe in tutti i sistemi e ogni singolo modulo risponderebbe selettivamente alla porzione di informazione adeguata alle proprie caratteristiche di elaborazione.

Dopo questo primo livello di analisi gli input musicali vengono elaborati da due vie differenziate che si occupano selettivamente degli aspetti melodici e di quelli temporali.

¹ La dinamica tensione/distensione che sfrutta i rapporti tonali tra note è una strategia compositiva tipica della musica che utilizza il sistema tonale, ossia la musica composta, grosso modo, tra la metà del sedicesimo secolo e la fine del diciannovesimo. Lo stesso sistema viene ancora oggi largamente utilizzato dalla popular music.

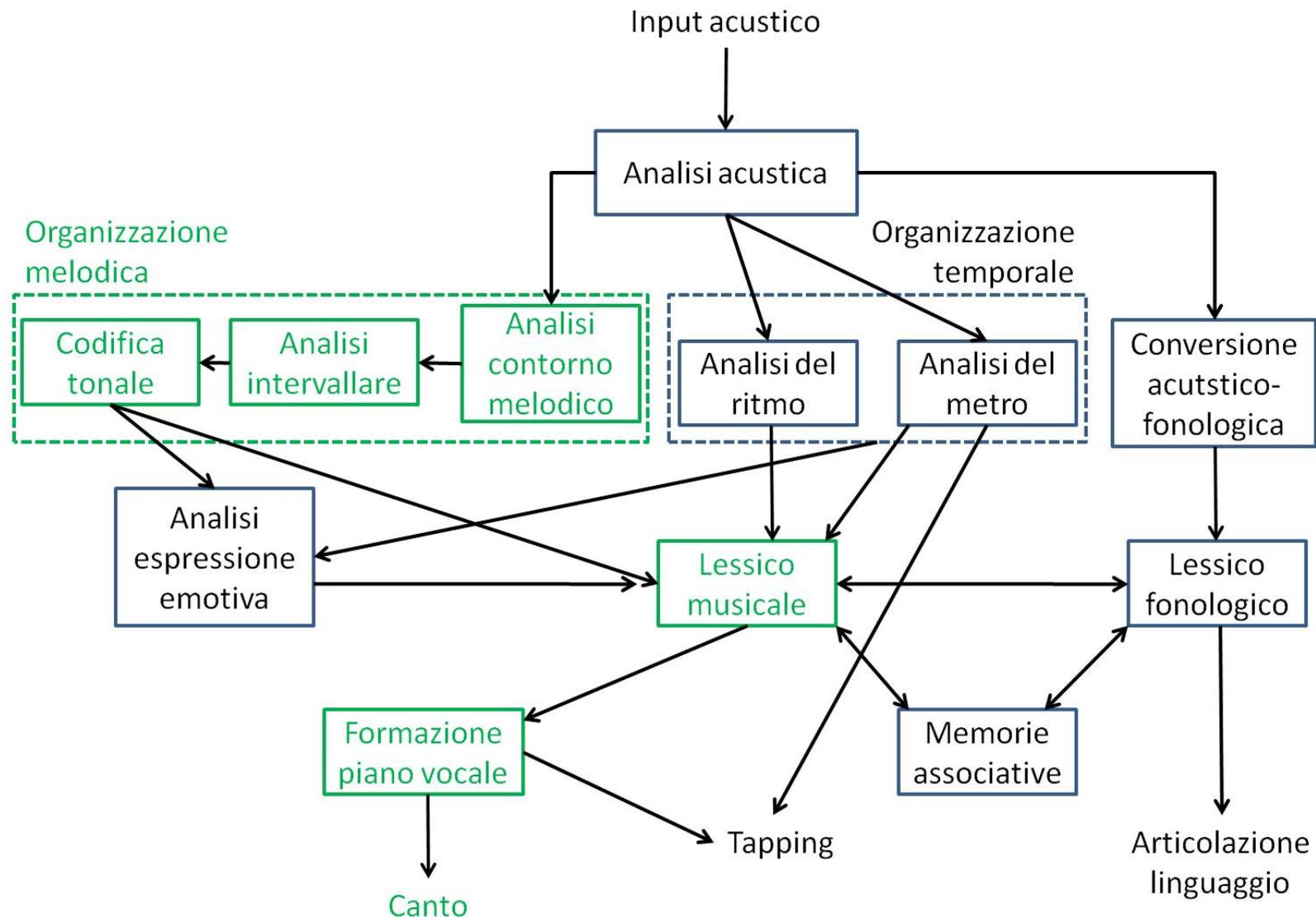


Figura 2.1. Modello modulare di elaborazione della musica. Gli elementi esclusivamente coinvolti nell'elaborazione della musica sono evidenziati in verde (Adattato da Peretz e Coltheart, 2003).

L'analisi dell'organizzazione melodica prevede un primo step in cui viene definito l'andamento del contorno melodico, ossia se la successione di suoni che compone la melodia si dirige verso l'acuto, verso il grave o rimane ferma su una stessa nota. Il risultato di questa elaborazione viene poi analizzato in termini di distanza intervallare tra le note, ossia di quanti "gradini" differiscono due note tra di loro. Successivamente avviene la codifica tonale, ossia vengono definiti i rapporti gerarchici tra le note. Questo aspetto, come detto sopra, costituisce un passaggio rilevante per una corretta comprensione della musica poiché permette di cogliere un elemento strutturale su cui si giocano molti dei significati da essa trasmessi. Il risultato definitivo di questa codifica melodica permette poi l'accesso al lessico musicale che contiene un repertorio di melodie apprese.

L'analisi delle componenti temporali di una melodia prevede due tappe che, a differenza di quanto avviene per l'analisi melodica, non presentano una strutturazione seriale. L'analisi del ritmo si occupa di valutare la durata dei singoli suoni di una melodia e permette di estrarre la specifica configurazione di note di durata diversa che caratterizza la melodia che si sta ascoltando. A differenza dell'analisi ritmica, che si occupa di ogni singolo suono, l'analisi metrica ha lo scopo di rilevare la presenza di cicli ripetitivi di accenti forti e deboli, in altre parole la periodica ricorrenza di elementi accentuativi con una specifica struttura. Un semplice esempio estratto dall'esperienza quotidiana può essere utile per definire meglio il concetto di "metro". Ognuno di noi sa, per esperienza diretta, cosa sia un valzer. Questa forma musicale presenta una caratteristica peculiare dal punto di vista metrico. Infatti quando pensiamo a un valzer una delle prime cose che ci vengono in mente è il suo andamento metrico, quell'"UN, due, tre" "UN, due, tre" che scandisce la melodia e che aiuta i ballerini a organizzare i passi di danza. Indipendentemente dalla durata dei singoli suoni che compongono la melodia, ossia dal ritmo, tutti i valzer sono organizzabili in questa pulsazione ternaria che presenta un accento forte sul primo battito ("UN" indica, nell'esempio, l'accento forte) e due accenti deboli sui successivi. Questo ciclo ternario di pulsazioni forti e deboli in cui la melodia può essere organizzata costituisce il Metro che caratterizza la forma musicale Valzer. L'estrazione della struttura metrica ci permette di battere con il piede la pulsazione di un brano che stiamo

ascoltando. Tanto i risultati dell'analisi ritmica quanto quelli dell'analisi metrica vengono poi inviati al lessico musicale per un eventuale confronto con musiche precedentemente apprese.

Sia la via di elaborazione dell'organizzazione melodica che quella dell'organizzazione temporale permettono di accedere a un sistema di analisi dell'espressione emotiva che permette di valutare il tipo di emozione espressa dalla musica che si sta ascoltando.

2.2.2 Modularità nei processi di produzione musicale

Lo studio dei processi modulari di produzione della musica è un campo di indagine ancora in divenire i cui risultati, a differenza di quelli visti nel paragrafo precedente, sono ancora a uno stadio preliminare. Non essendo presenti in letteratura modelli che definiscono le tappe di elaborazione delle diverse sottocomponenti, mi limiterò a una breve descrizione di alcune evidenze sperimentali che suggeriscono, anche per la produzione della musica, la presenza di processi a una struttura multicomponentiale.

Attualmente, le maggiori evidenze sperimentali a favore della modularità dei processi di produzione musicale provengono dallo studio delle dissociazioni tra abilità nel linguaggio parlato e abilità nel canto in pazienti con lesioni cerebrali o disfunzioni congenite. Una lesione cerebrale può interferire selettivamente con la produzione del linguaggio lasciando sostanzialmente intatta la capacità di cantare (Peretz e coll., 2004; Schlaug e coll., 2008; Wilson e coll., 2006). Diversi studi di caso singolo e di gruppo hanno dimostrato che pazienti afasici con importanti deficit di produzione lessicale possono non avere nessun problema nel cantare (usando una singola sillaba, ad esempio "la", al posto del testo) una melodia nota o appresa (Racette e coll., 2006; Warren e coll., 2003). Al contrario, alcuni pazienti possono perdere la capacità di cantare la melodia di una canzone ma essere in grado di recitarne il testo o di parlare con una corretta prosodia espressiva (Peretz e coll., 1994). Questo tipo di deficit è stato descritto non soltanto in soggetti senza alcuna formazione musicale, ma anche in musicisti professionisti (Schön e coll., 2004). Questi risultati suggeriscono che le vie di

elaborazione che si occupano del linguaggio parlato (anche se questo viene usato per cantare una canzone) sono distinte rispetto a quelle che si occupano di produrre per mezzo del canto una melodia.

Un'ulteriore strutturazione modulare che caratterizza i processi di produzione musicale sembra interessare tanto la dimensione dell'altezza del suono quanto quella del ritmo. Infatti, i pazienti con amusia congenita studiati da Isabelle Peretz (2008) presentavano selettive difficoltà nel canto intonato ma nessun deficit che riguardasse la componente ritmica della melodia prodotta (Dalla Bella e coll., 2007). Lo stesso tipo di profilo è stato descritto in pazienti con lesioni cerebrali (Peretz, 2006). Riguardo la dissociazione opposta, un primo studio pionieristico condotto da Alcock e colleghi (2000) ha dimostrato che pazienti con lesioni dell'emisfero sinistro possono avere chiari deficit nella produzione del ritmo senza nessuna compromissione riguardante la produzione della corretta altezza dei suoni. Una dissociazione simile in un musicista professionista incorso in una lesione temporo-parietale dell'emisfero cerebrale sinistro è stata descritta più di recente da Di Pietro e colleghi (2004).

Questi dati supportano in modo convincente l'ipotesi della presenza di un modulo mentale deputato alla produzione della musica, almeno per quanto riguarda le funzioni coinvolte nel canto di un brano musicale. In particolare la dicotomia "altezza del suono/aspetti temporali" sembra essere valida anche per i processi di produzione della musica. Il grado di finezza raggiunto nell'indagine di queste componenti risulta tuttavia ancora piuttosto grossolano, saranno necessarie dunque ulteriori indagini per meglio valutare la strutturazione multicomponentiale di queste abilità cognitive.

2.3 L'ascolto esperto

La strutturazione modulare dei processi di elaborazione musicale emersa dalle precedenti trattazioni è il frutto di studi che hanno interessato prevalentemente soggetti senza alcuna competenza in ambito musicale. È stato tuttavia dimostrato, come vedremo tra breve, che l'aver una specifica competenza musicale rende più complesso il sistema di processi di analisi coinvolti nell'ascolto della musica. In

particolare, possedere un repertorio motorio specifico per lo strumento musicale che si sta ascoltando, ad esempio essere un pianista e ascoltare musica suonata al pianoforte, comporta che l'ascolto diventi, in una certa misura, un'esperienza non soltanto uditiva ma anche motoria. Questo significa che le informazioni estratte dallo stimolo uditivo durante un ascolto esperto vanno ben oltre quelle previste dal modello proposto da Peretz e Coltheart (2003). Di conseguenza, il modello, nonostante gli indubbi pregi in termini di semplicità, chiarezza descrittiva e potere esplicativo, non cattura in modo completo un fenomeno sempre più studiato negli ultimi anni, ossia il coinvolgimento del sistema motorio nei processi percettivi.

Le evidenze sperimentali a favore di un coinvolgimento del sistema motorio in compiti di natura percettiva con stimoli musicali provengono tanto da studi comportamentali quanto da indagini elettrofisiologiche e di brain imaging funzionale (Cfr. Zatorre e coll., 2007 per una revisione della letteratura). In un recente studio che sfrutta un paradigma di interferenza, Drost e colleghi (2005b) hanno chiesto a due gruppi di partecipanti (pianisti e controlli non-musicisti) di suonare alternativamente sulla tastiera di un pianoforte due accordi in risposta a uno stimolo visivo costituito dall'accordo stesso in notazione musicale. Contestualmente a ogni stimolo visivo ne veniva presentato uno uditivo che poteva essere, rispetto al primo, congruente o incongruente. Nella condizione congruente l'accordo di Do Maggiore in notazione musicale era associato alla sua versione acustica eseguita con un timbro di pianoforte, nella condizione incongruente invece l'accordo di Do Maggiore in notazione musicale era associato con la versione acustica dell'accordo di Do Minore, generando così un'incongruenza tra lo stimolo visivo, fondamentale per il compito, e lo stimolo uditivo, che andava ignorato. I risultati mostrano che solo i pianisti presentavano tempi di reazione più lenti nella condizione incongruente rispetto alla congruente, nessun effetto era presente nei non-musicisti. Questo dimostra, secondo gli autori, che tanto lo stimolo visivo quanto quello uditivo generano una rappresentazione motoria che, nella condizione incongruente porterebbe a un conflitto nella selezione della risposta e dunque a una maggiore latenza di quest'ultima. In uno studio successivo (Drost e coll., 2007) questo fenomeno è stato ulteriormente indagato, ed è stato possibile

evidenziare il ruolo cruciale giocato dalle caratteristiche timbriche dello stimolo uditivo. In un recente studio D'Ausilio e colleghi (2010) hanno replicato i risultati ottenuti da Drost utilizzando un paradigma che manipolava la sincronizzazione tra i due stimoli uditivo e visivo. I risultati avvalorano l'ipotesi che la conversione dello stimolo uditivo in un piano motorio richieda circa 300 ms per completarsi, risultato congruente con indagini neurofisiologiche (Pizzamiglio e coll., 2005; Shahin e coll., 2008) e con il timing necessario all'attivazione della corteccia pre-motoria (Pizzamiglio e coll., 2005; Murray e coll., 2006), struttura coinvolta nella pianificazione, selezione ed esecuzione delle azioni in particolare di quelle guidate da uno stimolo esterno (Chouinard e Paus, 2006).

Sul versante degli studi elettrofisiologici, un lavoro di Haueisen e Knosche (2001) condotto con la magnetoencefalografia (MEG) ha dimostrato che l'ascolto di musiche precedentemente apprese da parte di pianisti attivava la corteccia motoria primaria (M1). Nessun effetto emergeva invece nel caso di musicisti non-pianisti. Un risultato simile è stato ottenuto da D'Ausilio e colleghi (2006) usando la Stimolazione Magnetica Transcranica (TMS). Nel loro studio un gruppo di pianisti studiava per 5 giorni un brano. Misurando, durante il semplice ascolto della melodia studiata, i potenziali evocati motori (MEP) dopo 30 minuti dall'inizio dello studio e dopo 5 giorni di studio, gli autori hanno evidenziato, nella prima condizione la presenza di facilitazione intracorticale a livello della corteccia motoria primaria cui si aggiungeva, nella seconda condizione, anche una facilitazione cortico-spinale. Nessuno di questi effetti era presente all'ascolto di una melodia di controllo o prima della fase di studio.

Risultati congruenti che approfondiscono ulteriormente questi dati elettrofisiologici provengono da alcuni studi di brain imaging. Bangert e colleghi (2006) hanno confrontato l'attivazione alla risonanza magnetica funzionale (fMRI) di pianisti e non musicisti durante l'ascolto di brevi melodie o l'esecuzione di semplici sequenze motorie su una tastiera di pianoforte muta, dunque senza alcun feedback uditivo. I risultati evidenziano chiaramente che per i pianisti tanto l'ascolto quanto l'esecuzione è associata alla contemporanea attivazione di aree motorie e aree uditive della corteccia

cerebrale. Nel caso dei non musicisti, invece, l'ascolto delle melodie attiva unicamente aree uditive mentre l'esecuzione delle sequenze motorie attiva solo aree motorie. Osservazioni analoghe sono emerse in successive indagini (Baumann e coll., 2007; Brown e Martinez, 2007; Margulis e coll., 2009).

L'ascolto esperto si configura dunque come un fenomeno che coinvolge non solo processi di natura uditiva ma anche competenze di carattere motorio. La natura multimodale delle rappresentazioni mentali coinvolte in questo tipo di ascolto richiede dunque una parziale revisione dei modelli modulari proposti per l'analisi percettiva della musica (Peretz e Coltheart, 2003).

3 L'interazione uditivo-motoria

3.1 Il rapporto tra percezione e azione

La definizione del concetto di interazione uditivo-motoria richiede una breve trattazione delle problematiche relative al rapporto tra percezione e azione. Ad oggi non esiste una visione univoca circa la relazione tra queste due funzioni, cercherò dunque di esporre brevemente due delle principali posizioni teoriche emerse nell'ambito delle scienze cognitive.

Il rapporto tra percezione e azione è stato concepito, per lungo tempo, come la relazione tra due entità nettamente separate e sostanzialmente indipendenti (Sanders, 1983). L'idea principale era che un flusso di informazioni provenienti dal sistema percettivo ed elaborate a livello del sistema cognitivo venisse successivamente inviato al sistema motorio per essere utilizzato al fine di compiere una determinata azione. In questa visione, basata su un principio di trasmissione seriale del flusso di informazioni, l'interazione reciproca tra i due sistemi, percettivo e motorio, è pressoché nulla e il sistema motorio non è altro che un semplice esecutore di ordini frutto dell'elaborazione cognitiva avvenuta ad altri livelli.

Questa visione strettamente seriale ha successivamente subito alcune modifiche. Evidenze sperimentali provenienti dalla neurofisiologia e dalla neuropsicologia cognitiva hanno permesso di definire un quadro molto più complesso. La nozione di serialità è stata parzialmente integrata da una concezione in parallelo delle varie tappe di elaborazione. Nell'ambito della percezione visiva, questo sviluppo lo si riscontra chiaramente nel modello a due vie proposto da Ungerleider e Mishkin (1982) e successivamente sviluppato da Milner e Goodale (1995). Il modello prevede un'iniziale analisi di basso livello nella corteccia visiva primaria seguita da un'analisi più approfondita che avviene in parallelo all'altezza dei lobi temporale e parietale. La via che procede dalla corteccia visiva al lobo temporale, detta anche via ventrale o via del "what", si occupa dell'analisi delle caratteristiche

strutturali degli oggetti e permette la corretta identificazione di quanto si sta osservando. La via che dalla corteccia visiva proietta al lobo parietale, via dorsale o via del “where”, si occupa invece di analizzare aspetti legati alla localizzazione nello spazio degli oggetti ed è cruciale in operazioni quali l’afferrare un oggetto o lo stimare la sua corretta posizione nello spazio. I processi di elaborazione visiva delle vie ventrale e dorsale sono stati definiti da Milner e Goodale (1995) rispettivamente “visione per la percezione” e “visione per l’azione”, sottolineando che quest’ultima non serve solo a indicare la posizione nello spazio degli oggetti percepiti, ma anche a guidare gli atti motori rivolti verso tali oggetti.

Nonostante la più articolata formulazione e la presenza di processi di elaborazione in parallelo, il modello a due vie continua a concepire come separati e non interattivi i sistemi percettivo e motorio.

L’idea di un’interazione continua e dinamica tra sistema percettivo e sistema motorio costituisce il nucleo fondante del concetto di “Analizzatore Motorio” (AM) proposto da Luria (1966). Secondo questo autore ogni atto motorio volontario viene pianificato sulla base di un “Modello del bisogno futuro” (l’obiettivo dell’azione) che possiede la proprietà di essere “invariante”, ossia di specificare uno stato di raggiungimento dell’obiettivo dell’azione indipendentemente dall’atto motorio con cui si ottiene il risultato. In altre parole, il Modello del bisogno futuro definisce il goal dell’azione e non l’atto motorio specifico e contingente con cui tale goal si raggiunge. In questa concettualizzazione risulta di fondamentale importanza il costante feedback percettivo sullo stato del sistema in movimento, poiché solo tale feedback assicura al sistema le informazioni necessarie per stabilire se il goal è stato raggiunto. Nel concetto di AM sono dunque compresi tanto aspetti percettivi quanto aspetti motori. Entrambe vengono di fatto inseriti in un sistema unico che controlla gli atti motori volontari. Dunque, diversamente dai modelli sopra riportati, in concetto di separazione funzionale tra i due sistemi viene sostituito da un concetto di reciproca interazione.

Un limite della proposta di Luria riguarda il fatto di non aver chiarito il modo in cui le rappresentazioni percettive e le rappresentazioni motorie interagiscono tra loro, aspetto che invece

viene indagato e approfondito nella Teoria del Codice Comune (TCC) di Wolfgang Prinz (1990; 1997). L'idea centrale di questa teoria è che gli eventi percepiti e le azioni pianificate condividono un dominio rappresentazionale comune, definito, appunto, Codice Comune. In termini molto generali ogni essere umano per operare correttamente nel proprio ambiente necessita di due tipi di rappresentazioni a livello del proprio sistema cognitivo, chiameremo queste rappresentazioni Codici. Uno di questi Codici deve rappresentare gli aspetti sensoriali del mondo che ci circonda ed è frutto della stimolazione che raggiunge gli organi di senso, l'altro deve rappresentare il modo in cui il nostro sistema motorio va attivato per agire nello spazio circostante. Questi due codici possono essere definiti Codice sensoriale e Codice motorio. Come possono il Codice sensoriale e quello motorio dialogare tra loro? E' comunemente accettata l'idea che questi due codici non possano interfacciarsi direttamente tra loro ma sia necessaria una qualche forma di *traslazione*, questo perché in termini di contenuto questi due codici sono incommensurabili. Infatti i Codici sensoriali "stanno per" specifici pattern di stimolazione degli organi di senso mentre i Codici motori "stanno per" altrettanto specifici pattern di attivazione del sistema muscolare.

Il seguente esempio cerca di illustrare questa situazione. Si immagini un semplicissimo esperimento in cui un soggetto deve premere alternativamente un pulsante con la mano destra o la mano sinistra ogni volta che vede, rispettivamente, una luce verde o rossa su uno schermo posto davanti a lui. In questo caso i Codici sensoriali rappresentano due diversi colori (verde e rosso) e i Codici motori le due mani che eseguono la risposta. Secondo una visione seriale della relazione tra percezione e azione, in questo scenario è necessario un qualche "dispositivo" che traduca i codici che "stanno per" i colori nei codici che "stanno per" il movimento delle mani in quanto, come abbiamo visto, questi due codici sono, tra loro, incommensurabili.

La teoria del Codice comune risolve questa situazione ipotizzando la presenza di un livello sovraordinato in cui codici sensoriali (afferenti) e codici motori (efferenti) condividono lo stesso formato rappresentazionale. In particolare, il codice comune è costituito dalla più tardiva

rappresentazione afferente (che si riferisce agli eventi dell'ambiente) e dalla più precoce rappresentazione efferente (che si riferisce agli eventi che si intende creare nell'ambiente). Queste rappresentazioni sono commensurabili in quanto entrambe si riferiscono ad eventi distali (Prinz 1992). Non è dunque necessario un dispositivo che esegua una *traslazione* del codice sensoriale in codice motorio. Date queste premesse, appare evidente l'intima relazione tra percezione e azione che emerge da questo quadro teorico. Infatti, una predizione cruciale di questa teoria è che la semplice percezione di un'azione attiva la rappresentazione motoria di quella stessa azione, e viceversa il richiamo della rappresentazione di una determinata azione influisce sulla percezione. Queste predizioni, più volte confermate dal punto di vista sperimentale (Cfr. Prinz, 1997; Hommel e coll., 2001 e Hommel, 2009 per una rassegna), e per le quali esistono evidenze convergenti dal punto di vista biologico (Rizzolatti e Craighero, 2004), ci conducono direttamente al tema principale di questo capitolo: le interazioni uditivo-motorie.

3.2 L'interazione uditivo-motoria: una definizione

L'interazione uditivo-motoria può essere definita come quel fenomeno di reciproco coinvolgimento e influenza tra i sistemi uditivo e motorio che avviene tanto durante la percezione uditiva di un suono rilevante dal punto di vista motorio quanto durante l'esecuzione di un'azione che produce un suono caratteristico. Un aspetto fondamentale di questa interazione è la sua natura bidirezionale, ossia la possibilità di esprimersi dal sistema uditivo verso il sistema motorio o viceversa. Nel primo caso il semplice ascolto di un qualsiasi suono per il quale si possiede un repertorio motorio (il suono prodotto da un'azione, come ad esempio schiacciare le dita) attiverà il relativo piano motorio, nel secondo, la pianificazione o l'esecuzione di un certo gesto del nostro repertorio atto a generare un determinato suono influirà sulla rilevazione di quello specifico evento percettivo.

Dal punto di vista interpretativo, il fenomeno dell'interazione uditivo-motoria costituisce un problema per quelle posizioni teoriche che concepiscono il rapporto tra percezione e azione come unidirezionale e vedono nell'azione un semplice output successivo all'analisi percettiva.

Diversamente, la Teoria del Codice Comune riconosce piena legittimità al fenomeno che costituisce una diretta predizione dei suoi assunti di base.

Le evidenze empiriche riguardo questo fenomeno sono ormai moltissime (Cfr. Aglioti e Pazzaglia, 2010 per una revisione della letteratura), e la rilevanza di tale fenomeno per la comprensione del funzionamento del sistema cognitivo e del sistema nervoso centrale è ampiamente riconosciuta (Zatorre e coll., 2007). Nei paragrafi successivi analizzerò questo fenomeno sia da un punto di vista generale che in riferimento all'ascolto e all'esecuzione musicale.

3.3 Rappresentazione delle azioni e interazione uditivo-motoria

3.3.1 Il principio ideomotorio

Negli ultimi anni si è osservato un interesse crescente verso le problematiche relative al rapporto tra aspetti percettivi e aspetti motori della cognizione umana. Storicamente, autori come Lotze (1852) e James (1890) hanno offerto valide argomentazioni per credere nella stretta relazione tra questi due aspetti. Il principio Ideomotorio da loro teorizzato costituisce un elegante costrutto teorico che prevede una stretta interazione tra sistema percettivo e sistema motorio al fine di formare rappresentazioni delle azioni e di controllare i gesti finalizzati. Tale principio prevede che il controllo delle azioni emerga dalla percezione dell'effetto sensoriale che una determinata azione ha prodotto. Eseguire un'azione genererebbe una associazione bidirezionale tra il pattern motorio che ha generato l'azione e gli effetti sensoriali da essa prodotti. Una volta che questa associazione è stata acquisita può essere usata per recuperare un movimento mediante l'anticipazione dei suoi effetti sensoriali, cioè seleziono l'azione partendo dagli effetti percettivi che voglio generare. Un esempio schematico di questo principio è rappresentato nella figura 3.1, tratta dai Principi di Psicologia di William James.

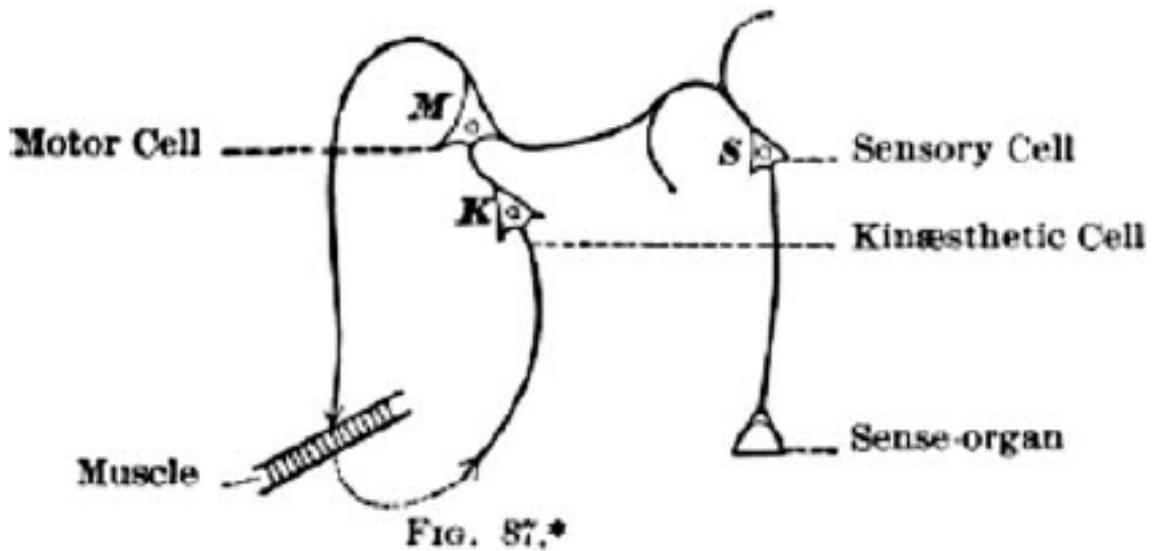


Figura 3.1. Modello neurale per l'acquisizione del controllo ideomotorio dell'azione. Fonte (James, 1890, p. 582).

Nel modello vengono rappresentate 3 cellule, un neurone motorio M la cui attivazione muove un muscolo (Muscle), un neurone sensoriale cenestesico K che registra i movimenti del muscolo e invia un feedback a M, e un neurone sensoriale S che registra le informazioni provenienti da un organo di senso (Sense organ). Immaginiamo che quello descritto sia un circuito neurale di base di un bambino appena nato. Nella sua fase di esplorazione del mondo questo bambino potrà a un certo punto attivare, per una qualsiasi ragione, il neurone M. Questa attivazione risulterà in un movimento che a sua volta produrrà una sensazione cenestesica mediata dall'attivazione del neurone K. Se questo succede una volta sola è probabile che non ne segua nulla, ma se questo succede in modo più sistematico si creerà una associazione tra l'attivazione di M e quella di K sulla base del principio hebbiano “what fires together wires together” (Greenwald, 1970). Di conseguenza, K diverrà una sorta di cue per M, ossia ricreare o anticipare l'esperienza percettiva codificata in K diventa un modo per attivare intenzionalmente M. In questo modo l'attivazione di M, e del movimento che esso invoca, è ora sottoposta a un controllo intenzionale². La stessa logica si applica a qualsiasi modalità sensoriale, i codici di qualsiasi conseguenza percettiva o effetto di un dato movimento possono venire

² L'esempio riportato è stato mutuato da Hommel, 2009.

integrati con i neuroni motori che producono quel movimento e dunque diventare la sua rappresentazione cognitiva.

Un principio del tutto analogo sta alla base del concetto di Engrammi cinestesico-innervatori (ECI) elaborato da Liepmann (1900). Gli ECI non sarebbero altro che delle memorie dei comandi motori e delle rispettive sensazioni propriocettive generate dall'esecuzione di una determinata azione. Ogni azione è composta da più ECI che vengono selezionati sulla base di un progetto d'azione costruito a partire da rappresentazioni di natura sensoriale che definiscono l'obiettivo dell'azione. Secondo Liepmann, l'atto motorio volontario è il risultato di una rappresentazione cosciente del movimento e del suo effetto sensoriale (visivo e cenestesico). Tale rappresentazione permette di selezionare gli ECI adeguati per raggiungere l'obiettivo proposti.

Le prove sperimentali a favore del principio ideomotorio sono ormai molteplici (Cfr. Hommel, 2009 per una rassegna) e suggeriscono che tale costrutto può effettivamente essere utile nel concettualizzare i problemi legati alla pianificazione dell'azione e all'interazione tra percezione e azione.

3.3.2 I neuroni specchio

La recente ipotesi sull'esistenza di neuroni specchio (Vedi Rizzolatti e Craighero, 2004) costituisce un'importante converging evidence dal punto di vista biologico del principio ideomotorio. Questa classe di neuroni, inizialmente individuata nella corteccia motoria della scimmia (area F5), risponde selettivamente tanto durante l'esecuzione di una determinata azione finalizzata quanto durante percezione di quella stessa azione eseguita da un altro individuo. Un aspetto cruciale legato al funzionamento di questi neuroni è il fatto che per attivarsi è necessario osservare un'azione volta a un preciso scopo come ad esempio, nel caso delle scimmie, portare del cibo alla bocca o prendere del cibo con le dita. Questa evidenza ha fatto ipotizzare che il ruolo fondamentale di questa classe di neuroni sia "il riconoscimento e la comprensione del significato degli eventi motori, ossia degli atti,

degli altri” (Rizzolatti e Sinigaglia, 2006, p. 96). Tali atti assumono un significato in virtù di un vocabolario di atti motori che l’osservatore possiede; dunque l’osservatore non appena riconosce negli eventi motori che sta osservando una serie di informazioni che rimandano a un determinato atto è in grado di risalire al tipo di atto motorio in corso e alle sue finalità: in definitiva comprenderlo. Questa qualità dei neuroni specchio di inferire il goal di una determinata azione sulla base di informazioni percettive ne fa un correlato biologico ideale del principio ideomotorio. Infatti, se il principio ideomotorio postula che l’azione viene controllata attraverso l’anticipazione degli effetti percettivi che essa genera, e se esiste nel sistema nervoso centrale una classe di neuroni che codifica tanto gli aspetti percettivi quanto quelli motori di un’azione in termini di azione finalizzata, ciò comporta che l’intuizione di Lotze e James poggi su forti basi biologiche. Infatti codificare un’azione in termini di obiettivi comporta, ipso facto, codificare gli effetti percettivi generati da quella determinata azione.

Un esperimento condotto da Umiltà e colleghi (2001) permetterà di chiarire meglio il concetto. Per dimostrare che i neuroni specchio non codificano semplicemente gli aspetti visivi di un’azione ma creano una rappresentazione percettivo-motoria del goal di un’azione, codificano cioè gli aspetti sensoriali e motori di azioni finalizzate, questi autori hanno condotto un elegante esperimento in cui hanno misurato la risposta dei neuroni specchio di F5 di alcune scimmie. Il setting sperimentale prevedeva che l’animale osservasse lo sperimentatore mentre dirigeva la mano verso un oggetto per prenderlo. La manipolazione cruciale, mostrata nella figura 3.2, era la presenza di un schermo che copriva la fase finale del gesto, ossia l’interazione mano-oggetto, in due delle quattro condizioni sperimentali.

Le quattro condizioni dell’esperimento erano le seguenti: movimento di presa con interazione mano-oggetto visibile o schermata (condizioni A e B di figura 3.2), pantomima del movimento di presa con fase finale del gesto visibile o schermata (condizioni C e D di figura 3.2). Bisogna precisare che l’animale era consapevole della presenza o assenza di un oggetto dietro lo schermo nelle condizioni

B e D. L'aspetto cruciale di questo esperimento risiede nelle due condizioni con schermo. Infatti, dal punto di vista percettivo il movimento osservato nella condizione B è assolutamente identico a quello osservato nella condizione D. Dunque, se i neuroni specchio si limitassero a codificare gli aspetti percettivi di un gesto, anziché il goal di un atto motorio, non ci dovrebbe essere differenza nella risposta di questi neuroni nelle due condizioni schermate. Come si può osservare dai grafici di attivazione della figura 3.2, i neuroni specchio di F5 si attivano non solo quando l'animale vede il gesto di afferramento completo (condizione A) ma anche quando osserva solo la fase iniziale dello stesso gesto (condizione B). Viceversa, non si rileva nessuna attivazione quando l'animale osserva la pantomima per intero (condizione C) o solo nella sua fase iniziale (condizione D). Appare dunque evidente che il comportamento dei neuroni specchio di F5 suggerisce una codifica del gesto nei termini del suo scopo finale, tanto che pur non avendo accesso visivo alla parte finale del gesto la rappresentazione generata dal vederne solo la prima parte è sufficiente per completare il significato dell'atto motorio in esecuzione e dunque per comprendere il tipo di azione in corso.

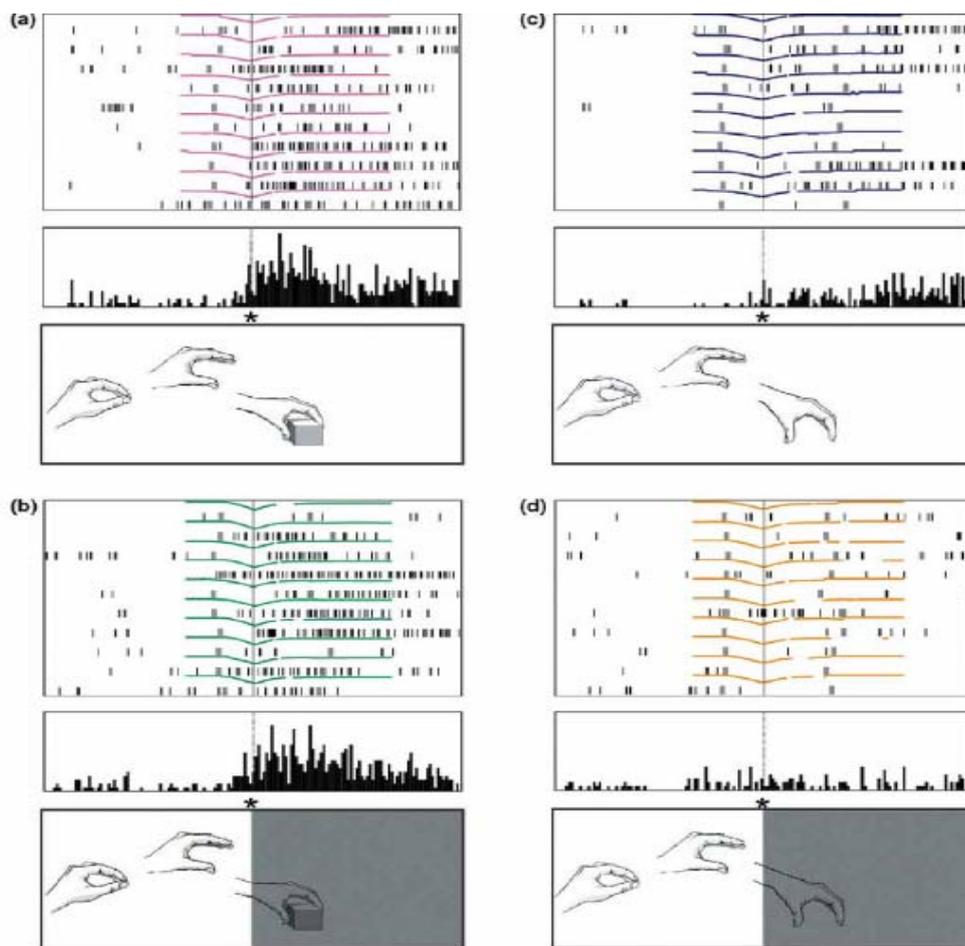


Figura 3.2. Dispositivo sperimentale e mappe di risposta di un neurone di F5 nelle diverse condizioni sperimentali dello studio di Umiltà e coll., 2001 (vedi il testo per una descrizione accurata). Fonte: Umiltà e colleghi, 2001.

Ritornando al principio ideomotorio, risulterà ora più chiaro come i Neuroni Specchio siano un ottimo candidato per il ruolo di substrato biologico di una rappresentazione delle azioni basata sugli effetti percettivi da esse generate.

Ma quali sono le prove dell'esistenza dei neuroni specchio nell'essere umano? Fino ad ora abbiamo parlato, infatti, solo di primati non umani. A differenza degli studi condotti sulle scimmie, nelle quali è stata usata una tecnica di misurazione in vivo dell'attività dei neuroni mediante microelettrodi posizionati nella corteccia cerebrale dell'animale, le evidenze sperimentali a favore dell'esistenza di un sistema di neuroni specchio anche nell'uomo sono, in larga parte, indirette, ossia ottenute mediante strumentazioni che misurano dei correlati fisiologici dell'attività neuronale quali ad esempio le variazioni nel rapporto di emoglobina ossigenata e de-ossigenata a livello delle aree

corticali cerebrali attive durante un compito cognitivo (segnale BOLD), oppure l'attività elettrica o magnetica dei neuroni della corteccia cerebrale misurata attraverso lo scalpo (Rizzolatti e Craighero, 2004). Solo recentemente un gruppo di lavoro statunitense (Mukamel e coll., 2010) ha dimostrato l'esistenza di neuroni con proprietà specchio nella corteccia frontale mediale e temporale dell'essere umano, usando una misurazione diretta dell'attività elettrica dei neuroni, dunque una misura del tutto simile a quella usata nei primati non umani. La mole di dati raccolta fino ad oggi mediante le più svariate tecniche di neuroimmagine unite ai risultati dello studio di Mukamel e colleghi (2010) permettono quindi di concludere, con ragionevole certezza, che un sistema di neuroni mirror sia presente e attivo anche nell'essere umano.

3.3.3 I neuroni specchio uditivi

Un'ulteriore evidenza sperimentale a conferma dell'ipotesi che i neuroni specchio codifichino il significato di una determinata azione arriva da uno studio di Evelyne Kohler e colleghi (2002). Questo studio ha consentito di individuare tra i neuroni specchio dell'area F5 della scimmia un tipo particolare di neuroni bimodali (neuroni audio-visivi) che si attivano quando l'animale osserva lo sperimentatore compiere una determinata azione che produce un suono caratteristico (ad esempio rompere delle noccioline con le mani), quando l'animale ascolta il rumore prodotto dall'azione senza però vederla e quando l'animale esegue l'azione.

L'esistenza di questa classe di neuroni specchio indica chiaramente che una determinata azione può essere codificata in riferimento a più aspetti sensoriali e non solo rispetto alla modalità visiva. I neuroni specchio uditivi costituiscono una forte base biologica per i fenomeni di interazione uditivo-motoria, infatti la loro attività costituisce una chiara dimostrazione di come il sistema motorio possa attivarsi sulla base della percezione di stimoli uditivi. Il seguente paragrafo è dedicato alla trattazione di questi fenomeni nell'essere umano, passerò poi a trattare lo stesso argomento nell'ambito della musica.

3.4 Interazioni uditivo-motorie: evidenze empiriche nell'essere umano

Il coinvolgimento del sistema motorio nella percezione di stimoli uditivi è un argomento di recente interesse nell'ambito delle neuroscienze cognitive. Diverse evidenze sperimentali mostrano chiaramente che la percezione di stimoli uditivi prodotti da una determinata azione attiva, a livello cerebrale, le medesime aree coinvolte nell'esecuzione di quelle stesse azioni (Cfr. Aglioti e Pazzaglia, 2010 per una rassegna e Rumiati e coll., 2010 per un interessante approccio metodologico). Di seguito presento alcune evidenze sperimentali a favore di questo fenomeno.

In un recente studio Pazzaglia e colleghi (2008) hanno dimostrato che un gruppo di pazienti affetti da aprassia presentava un deficit nel riconoscimento di suoni prodotti da una determinata azione. Questo studio è particolarmente elegante in quanto sfrutta il concetto di doppia dissociazione per dimostrare non solo che la presenza di aprassia compromette selettivamente le capacità di riconoscimento di suoni generati da un'azione, ma anche l'esistenza di una specifica relazione tra la sede del deficit aprassico (aprassia bucco-facciale vs aprassia degli arti) e la classe di suoni per i quali emerge il deficit di riconoscimento (suoni prodotti con la bocca vs suoni prodotti con gli arti). In questo studio gli autori hanno presentato a cinque gruppi di pazienti (uno con aprassia bucco-facciale, uno con aprassia degli arti, uno con entrambe le forme di aprassia, uno con lesioni dell'emisfero sinistro senza aprassia e uno con lesioni dell'emisfero destro senza aprassia) un compito di riconoscimento di suoni appartenenti a tre categorie: suoni prodotti con la bocca, suoni prodotti con le mani e suoni naturali non legati a specifiche azioni (ad es. il miagolare di un gatto). I suoni delle prime due categorie potevano essere intransitivi, nel caso in cui il gesto che li generava non sfruttava alcun oggetto (ad es. sbadigliare o schioccare le dita), oppure transitivi, nel caso in cui il gesto che li generava sfruttava un oggetto (ad es. succhiare del liquido da una cannuccia o usare una sega a mano). Durante il compito i partecipanti dovevano ascoltare il suono e indicare tra quattro immagini proposte quella che rappresentava il gesto che solitamente produce il suono appena sentito. I risultati mostrano che i

pazienti con aprassia bucco-facciale presentavano una selettiva difficoltà nel riconoscimento di suoni prodotti con la bocca (transitivi e non transitivi) ma nessun deficit nel caso dei suoni prodotti con le mani; i pazienti con aprassia degli arti presentavano invece il deficit opposto. Nessuno dei due gruppi presentava invece difficoltà con i suoni naturali. La prestazione degli altri tre gruppi non rivelava nessuna differenza per le tre categorie di suoni. Questi risultati conducono a due interessanti conclusioni: la prima è che dal punto di vista comportamentale c'è una stretta relazione tra riconoscimento uditivo delle azioni e capacità di esecuzione delle azioni; la seconda è che le regioni cerebrali coinvolte nell'esecuzione delle azioni sono coinvolte anche nel riconoscimento di aspetti percettivi legati a quelle stesse azioni. Questo dato rinforza ulteriormente l'idea che percezione e azione siano due funzioni strettamente legate tra loro e interdipendenti.

Un risultato compatibile con quello precedente è stato recentemente ottenuto in uno studio condotto con pazienti affetti da degenerazione cortico-basale (CBD) o da paralisi soprannucleare progressiva (PSP), due patologie neurodegenerative caratterizzate da importanti deficit di natura motoria (Chow e colleghi, 2010). Questi pazienti, insieme a un gruppo di controllo e ad altri due gruppi di pazienti affetti da una diversa patologia neurodegenerativa (Demenza tipo Alzheimer e Demenza Fronto-Temporale), sono stati sottoposti a una batteria di denominazione di oggetti a partire dai suoni prodotti da tali oggetti. I suoni appartenevano a due classi: suoni prodotti da oggetti manipolati con le mani (ad esempio il suono prodotto dall'uso di un martello) e suoni tipici di oggetti non manipolati. I partecipanti erano invitati, durante due successive somministrazioni della batteria, a dire il nome dell'oggetto che solitamente produce il suono che stavano ascoltando oppure ad eseguire un compito di matching suono-figura tra quattro possibili alternative. I risultati mostrano, per i pazienti con CBD e PSP, la presenza di un deficit di denominazione selettivo riguardante i suoni prodotti da oggetti manipolati. Nessuna differenza era invece presente, tra i diversi gruppi di pazienti con patologia degenerativa, nella prestazione al compito di matching suono-figura. Una successiva analisi di correlazione tra le caratteristiche dell'atrofia corticale (analizzate con la Voxel Based Morphometry) e la prestazione alla batteria di denominazione ha rivelato la presenza di una correlazione tra punteggi

bassi alla denominazione di suoni prodotti da oggetti manipolati e atrofia corticale delle regioni premotorie bilaterali con una maggiore incidenza del fenomeno nell'emisfero cerebrale sinistro. Questi elementi supportano l'ipotesi che alcune aree corticali motorie siano coinvolte nell'accesso alle conoscenze lessicali riguardanti le azioni.

Evidenze convergenti circa il coinvolgimento del sistema motorio durante la percezione di suoni associati ad azioni specifiche provengono da alcune ricerche che hanno sfruttato la Stimolazione Magnetica Transcranica (TMS). Questa letteratura ha indagato prevalentemente la relazione tra suoni linguistici e sistema motorio bucco-facciale. In uno studio condotto da Fadiga e colleghi (2002) è emerso un aumento dei potenziali evocati motori registrati dai muscoli della lingua durante l'ascolto di parole contenenti fonemi che, quando pronunciati, coinvolgono in modo massiccio questi muscoli. L'esperimento prevedeva che i partecipanti ascoltassero passivamente tre categorie di stimoli uditivi: parole bisillabiche contenenti o una doppia consonante vibrante alveolare [r] o una doppia consonante fricativa labio-dentale [f] (nel produrre il primo tipo di consonanti c'è un maggiore coinvolgimento dei muscoli della lingua); non parole bisillabiche contenenti le stesse consonanti; suoni bitonali. Durante l'ascolto venivano registrati i potenziali evocati motori generati da una stimolazione TMS a singolo impulso indirizzata sulla porzione di corteccia motoria primaria sinistra responsabile dei movimenti della lingua. Dai risultati è emerso che l'ascolto di parole con doppia "r" comportava la presenza di potenziali evocati motori a livello dei muscoli della lingua più ampi rispetto alle altre condizioni. Ciò dimostrerebbe che durante l'ascolto di stimoli verbali vi sarebbe una attivazione dei centri motori associati alla produzione di quegli stessi stimoli. Risultati congruenti con quelli di Fadiga e colleghi (2002) sono emersi in uno studio TMS condotto da Watkins e colleghi (2003) in cui sono stati rilevati i potenziali evocati motori a livello dei muscoli delle labbra durante l'ascolto di un brano letto da uno speaker. Anche in questo caso l'ascolto di suoni verbali, rispetto a suoni non verbali, generava potenziali evocati motori significativamente più ampi. Un ulteriore risultato di questo esperimento riguarda la selettività emisferica: solo la stimolazione dell'area motoria dell'emisfero sinistro generava l'effetto, che invece spariva durante la

stimolazione dell'area motoria dell'emisfero destro. Quest'ultimo risultato è presumibilmente da attribuire alla natura linguistica degli stimoli utilizzati.

Sebbene i due precedenti studi mostrino chiaramente un coinvolgimento del sistema motorio buccofacciale durante l'ascolto di stimoli verbali, nessuno dei due risultati permette di concludere che il sistema motorio possa avere un ruolo attivo nella discriminazione e nel riconoscimento di suoni verbali. Un recente studio (D'Ausilio e coll., 2009) permette tuttavia di difendere quest'ultima ipotesi. Gli autori, sfruttando un modello di doppia dissociazione, evidenziano come la stimolazione TMS a doppio impulso diretta sulla corteccia motoria primaria possa facilitare la discriminazione di fonemi. In questo studio ai partecipanti era richiesto di discriminare tra suoni labiali ([b] e [p]) e suoni dentali ([d] e [t]). Nella produzione dei primi è di cruciale importanza il movimento delle labbra, mentre per la produzione dei secondi è fondamentale il movimento della lingua. Durante il compito di discriminazione ai partecipanti veniva somministrata, alternativamente, una stimolazione TMS a doppio impulso sulle aree della corteccia motoria primaria che controllano i movimenti delle labbra (M1-labbra) e i movimenti della lingua (M1-lingua). I risultati mostrano che la stimolazione di M1-labbra facilitava la discriminazione dei suoni labiali e inibiva quella di suoni dentali, mentre con la stimolazione di M1-lingua si otteneva il pattern opposto. L'effetto è evidente tanto nei tempi di reazione quanto nella percentuale di errori. Questi dati costituiscono una interessante prova del coinvolgimento del sistema motorio in un più ampio network responsabile dell'elaborazione del linguaggio. Un ulteriore dato di rilievo è la relazione somatotopica tra effettore deputato alla produzione di un determinato suono e area motoria, che controlla quell'effettore, coinvolta nei processi percettivi di quello specifico suono. Approfondirò questo aspetto nel paragrafo successivo.

Mentre le principali ricerche TMS sull'interazione uditivo-motoria hanno impiegato quasi esclusivamente stimoli linguistici, le indagini che hanno sfruttato la risonanza magnetica funzionale (fMRI) presentano una maggiore varietà di stimoli sonori legati ad azioni.

Uno tra i primi studi fMRI che ha riscontrato evidenze di interazione uditivo-motoria nell'essere umano è stato condotto da Lewis e colleghi (2005). In questa ricerca i partecipanti sono stati sottoposti a due compiti, uno di categorizzazione di suoni naturali (versi di animali) o artificiali (suoni prodotti da utensili), l'altro di pantomima dell'utilizzo di utensili. I risultati mostrano in modo chiaro che l'attivazione ottenuta per la classe di suoni prodotti da utensili al compito di categorizzazione è in buona parte sovrapponibile a quella ottenuta al compito di pantomima. Tale attivazione comprendeva le aree parietali posteriori, pre-motorie ventrali e frontali inferiori quasi esclusivamente dell'emisfero sinistro. Questo dato suggerisce che l'elaborazione percettiva di suoni con rilevanza motoria coinvolge un complesso circuito neurale che comprende anche le aree motorie deputate all'esecuzione pratica dei gesti utili alla produzione di quei suoni.

Mentre lo studio precedente non aveva come obiettivo principale quello di indagare la presenza di interazioni uditivo-motorie nell'uomo, un'indagine di poco successiva, quella di Gazzola e colleghi (2006), può essere annoverata tra i primi studi condotti con la fMRI allo scopo di indagare esplicitamente questo fenomeno, e in particolare la presenza di un sistema di neuroni specchio uditivi anche nell'essere umano. In questa ricerca i partecipanti sono stati sottoposti a due compiti, uno percettivo e uno motorio, allo scopo di identificare un network di aree corticali cerebrali comuni a questi due tipi di compiti. Nel primo i soggetti eseguivano un compito di detezione odd-ball, ossia, ascoltando una sequenza di suoni tutti uguali intercalati, in modo randomizzato, da un suono diverso, i soggetti dovevano segnalare il momento in cui appariva lo stimolo deviante. I suoni appartenevano a due categorie, suoni caratteristici di azioni eseguite con le mani e suoni caratteristici di azioni eseguite con la bocca. Le due versioni degli stimoli odd-ball erano suoni manuali intercalati da un suono tipico di azioni con la bocca o viceversa. Vi erano poi delle condizioni con suoni di controllo. Il compito motorio prevedeva invece l'esecuzione di semplici gesti di grasping con la mano destra o di afferramento con le labbra. I risultati mostrano che tanto nel compito percettivo quanto in quello motorio si attivava un network di aree temporo-parietali e premotorie nell'emisfero sinistro, indice della presenza di un sistema specchio uditivo anche nella corteccia cerebrale umana. L'aspetto di

rilievo è che a livello premotorio l'attivazione aveva caratteristiche somatotopiche tanto nel compito percettivo quanto in quello motorio, presentando un cluster di attivazione più dorsale per i suoni e i gesti prodotti con le mani e un cluster più ventrale per i suoni e i gesti prodotti con la bocca.

In un recente studio Galati e colleghi (2008) hanno analizzato, con un paradigma di masked priming applicato alla fMRI, quali aree corticali fossero associate all'elaborazione del contenuto semantico di suoni rilevanti dal punto di vista motorio. Il loro obiettivo era quello di identificare un sistema di neuroni specchio uditivi che codificano le azioni dal punto di vista dell'obiettivo finale, dunque indipendentemente dall'effettore che produce l'azione. Il compito prevedeva che i partecipanti eseguissero una discriminazione tra suoni prodotti, o meno, da azioni umane. Gli stimoli sonori della categoria "azioni umane" prevedevano suoni prodotti con le mani e suoni prodotti con la bocca. Poco prima dello stimolo target i soggetti vedevano in modo subliminale (masked prime) una parola che poteva essere congruente o incongruente con il suono che dovevano giudicare (ad es. prime = fischia, target = suono di fischio, oppure, prime = treno, target = suono di treno su rotaie). Il principio fondamentale su cui si basa il lavoro è che solo le aree in cui è evidente una modulazione dell'attivazione da parte della condizione di priming (congruente vs incongruente) sono associate alla elaborazione semantica di quella specifica categoria di stimoli per i quali rispondono. In altre parole, se l'area X si attiva selettivamente all'ascolto di suoni prodotti da azioni umane e la sua attivazione è modulata dal priming (es. attivazione maggiore con priming congruente vs attivazione minore con priming incongruente), allora quell'area è coinvolta nell'elaborazione semantica di quegli stimoli. I risultati mostrano che l'ascolto di suoni prodotti da azioni umane attiva un network di aree che comprende la corteccia frontale inferiore sinistra e temporale posteriore sinistra e che gli autori definiscono sistema specchio uditivo. Tali aree rispondono selettivamente al priming e non presentano alcuna proprietà somatotopica, ossia non è presente una mappatura diversa per i suoni prodotti dalle mani rispetto a quelli prodotti con la bocca. Ad esclusione degli aspetti legati alla somatotopia, questi risultati appaiono in linea con i due precedenti studi. Inoltre, confermano quanto

emerso in una precedente ricerca (Pizzamiglio e coll., 2005) che ha sfruttato un paradigma simile applicandolo alla misurazione dei Potenziali Evento Correlati (ERPs).

Complessivamente, il quadro che emerge dagli studi sopra riportati suggerisce, dal punto di vista funzionale, l'esistenza di una forte sovrapposizione tra sistemi di elaborazione percettiva di suoni rilevanti dal punto di vista motorio e processi deputati all'esecuzione di gesti utili a produrre tali suoni. Tale riscontro, confermato dagli studi TMS, avvalorata l'ipotesi avanzata dalla teoria del codice comune (Prinz, 1997), ossia l'esistenza di rappresentazioni condivise tra aspetti sensoriali e aspetti motori di un'azione. Riguardo la rappresentazione neurale di tali processi, gli studi di attivazione funzionale suggeriscono l'esistenza di un complesso network fronto-parieto-temporale principalmente localizzato a livello dell'emisfero cerebrale sinistro. Tale network audio-motorio è attivamente coinvolto tanto nel mapping di suoni rilevanti dal punto di vista motorio quanto nell'esecuzione dei gesti che generano tali suoni. Un dato di rilievo è l'organizzazione somatotopica delle rappresentazioni mappate da questo network. Secondo alcuni studiosi, tale sistema costituirebbe il corrispondente umano del sistema di neuroni specchio individuato nei primati (Craigheo e coll., 2007).

3.5 Interazioni uditivo-motorie nella musica

Come è facile intuire dal paragrafo precedente, il fenomeno delle interazioni uditivo-motorie può interessare molti aspetti della vita quotidiana. Spesso ci capita di ascoltare il suono associato a una determinata azione (ad es. battere le mani, fischiare, martellare, ecc.) e raffigurarci, più o meno consapevolmente, il gesto che lo ha prodotto. Il tutto senza la necessità di osservare la persona che lo sta eseguendo. Secondo alcuni autori questa capacità è coinvolta anche nei processi di comprensione dei suoni linguistici (Liberman e coll., 1967; Pulvermüller e Fadiga, 2009), tuttavia non c'è un completo accordo tra i vari studiosi riguardo questa posizione (Hickok, 2010). Al di là della querelle riguardo il coinvolgimento del sistema motorio nella comprensione del linguaggio, argomento che esula dagli obiettivi di questo lavoro, il caso della produzione e percezione linguistica costituisce

sicuramente un ambito interessante nel quale studiare, a più livelli, il fenomeno dell'interazione uditivo-motoria. Infatti, da un lato la produzione del linguaggio comporta una serie di gesti ben definiti la cui esecuzione produce un'altrettanto definita sequenza di suoni cui sono associati dei significati. Dall'altro la percezione del linguaggio comporta l'elaborazione di questi ultimi segnali da parte di un ricevente che condivide il repertorio motorio che ha permesso di produrli. Come ho dimostrato nei paragrafi precedenti, le prove a favore del coinvolgimento del sistema motorio durante l'ascolto³ del linguaggio sono ormai molteplici e la presenza di riscontri precisi riguardo la raffinatezza con cui tale coinvolgimento avviene sono interessanti e abbastanza convincenti (Cfr. D'Ausilio e coll., 2010 per una rassegna). Tuttavia l'estrema complessità del comportamento verbale rende lo studio delle interazioni uditivo-motorie in questo ambito piuttosto complesso. Questa constatazione ci invita a chiederci: esiste un altro ambito dell'attività umana nel quale vi sia una ricchezza motoria pari a quella necessaria per la produzione del linguaggio e in cui l'esecuzione di questi gesti produca dei suoni associati a significati condivisi? La risposta è ovviamente affermativa e l'ambito in questione è quello dell'esecuzione e ascolto della musica.

Dal punto di vista delle interazioni uditivo-motorie lo studio di soggetti con competenze musicali è sicuramente un ambito privilegiato. Essi presentano un ricco repertorio motorio cui si associano una serie di effetti sonori con qualità ben precise e isolabili (ad es. timbro, altezza del suono, struttura melodica o ritmica) che ben si prestano alle più varie forme di manipolazione sperimentale. Inoltre, il fatto che il mapping motorio necessario per suonare uno strumento sia un comportamento non comune a tutti gli esseri umani ma tuttavia facilmente sviluppabile almeno nei suoi elementi di base, rende l'indagine dei processi di sviluppo delle interazioni uditivo-motorie più semplice e più facilmente interpretabile rispetto allo stesso tipo di indagine nell'ambito del linguaggio. Di seguito presenterò una serie di studi che hanno indagato le interazioni uditivo-motorie nei musicisti. Questa

³ L'uso, in questo punto, della locuzione "ascolto del linguaggio" al posto di "comprensione del linguaggio" non è casuale, ma volta a rendere conto dell'incertezza attuale riguardo un reale coinvolgimento del sistema motorio nei processi di comprensione linguistica.

rassegna ha un duplice scopo, in primo luogo quello di illustrare i risultati ottenuti dalla ricerca sperimentale nell'ambito in oggetto, in secondo luogo quello di mostrare come lo studio del comportamento musicale permetta di raggiungere importanti risultati in merito alla comprensione del funzionamento cognitivo in quanto tale e non limitatamente a quelle componenti utili alla produzione e comprensione della musica (Zatorre, 2005).

Uno dei primi studi che ha dimostrato la presenza di una forma di interazione uditivo-motoria nei musicisti è quello di Drost e colleghi (2005b). Gli autori hanno chiesto a due gruppi di partecipanti (pianisti e controlli non-musicisti) di suonare alternativamente sulla tastiera di un pianoforte due accordi in risposta a uno stimolo visivo costituito dall'accordo stesso in notazione musicale. Contestualmente a ogni stimolo visivo ne veniva presentato uno uditivo che poteva essere, rispetto al primo, congruente o incongruente. Nella condizione congruente l'accordo di Do Maggiore in notazione musicale era associato alla sua versione acustica eseguita con un timbro di pianoforte, nella condizione incongruente invece l'accordo di Do Maggiore in notazione musicale era associato con la versione acustica dell'accordo di Do Minore, generando così un'incongruenza tra lo stimolo visivo, fondamentale per il compito, e lo stimolo uditivo, che andava ignorato. I risultati mostrano che solo i pianisti presentavano tempi di reazione più lenti nella condizione incongruente rispetto alla congruente, nessun effetto era presente nei non-musicisti. Questo dimostra, secondo gli autori, che tanto lo stimolo visivo quanto quello uditivo generano una rappresentazione motoria che, nella condizione incongruente porterebbe a un conflitto nella selezione della risposta e dunque a una maggiore latenza di quest'ultima. In uno studio successivo (Drost e coll., 2007) questo fenomeno è stato ulteriormente indagato per chiarire quali caratteristiche qualitative dello stimolo uditivo erano cruciali per l'emergere dell'effetto di interazione. Questa volta i partecipanti erano tutti musicisti appartenenti a due categorie, pianisti e chitarristi. Il compito sperimentale era sostanzialmente identico al precedente, le uniche differenze riguardavano la modalità di risposta dei chitarristi, che usavano la tastiera di una chitarra anziché quella del pianoforte, e le caratteristiche timbriche degli stimoli uditivi, che appartenevano a cinque diversi strumenti musicali (chitarra, pianoforte, organo,

flauto e voce umana). I risultati hanno evidenziato il ruolo cruciale giocato dalle caratteristiche timbriche dello stimolo uditivo. Infatti, l'effetto di interazione nel gruppo dei pianisti era presente solo quando i partecipanti ascoltavano suoni di pianoforte o di organo. Nel caso dei chitarristi invece l'effetto emergeva solo con i suoni di chitarra. Ciò dimostra che l'accesso per via uditiva alla rappresentazione motoria avviene solo quando un musicista ascolta suoni prodotti con il proprio strumento di riferimento. Non è dunque sufficiente che il suono abbia caratteristiche armoniche simili (in questo caso essere un accordo di Do maggiore o Do minore). Il risultato ottenuto dai pianisti permette tuttavia di fare un'ulteriore interessante considerazione. Per questi ultimi anche i suoni di organo generavano l'effetto di interazione uditivo-motoria, nonostante l'esperienza di esecuzione su questi strumenti fosse, per la maggior parte di loro, scarsa o inesistente. Ciò permette di concludere che, qualora vi sia una sostanziale sovrapposizione tra repertori motori utili a produrre suoni con caratteristiche timbriche diverse, non è necessaria un'esperienza di apprendimento diretto per far sì che l'effetto di interazione emerga. Questo suggerisce che il sistema alla base delle interazioni uditivo-motorie sia in grado, entro certi limiti, di "generalizzare le proprie conoscenze" ad ambiti non direttamente o scarsamente sperimentati dal punto di vista pratico.

Una recente indagine condotta da D'Ausilio e coll. (2010) ha ulteriormente approfondito i risultati ottenuti da Drost indagando la dinamica temporale entro cui il fenomeno di interazione uditivo-motoria emerge. In questo studio i partecipanti, tutti pianisti, erano invitati ad eseguire sulla tastiera di un pianoforte una breve sequenza di due note che apparivano, una per volta in notazione musicale, sullo schermo di un computer. La seconda nota poteva essere preceduta o seguita da un suono costituito dalla stessa nota o da una nota vicina. Questa manipolazione generava due condizioni di congruenza tra stimolo visivo e stimolo sonoro (congruente, nota scritta e sentita erano uguali, o incongruente, nota scritta e sentita erano diverse). La manipolazione cruciale, oltre alla congruenza tra nota da eseguire e nota sentita, riguardava la sincronizzazione tra la comparsa della seconda nota e l'inizio dello stimolo uditivo. Il modello complessivo prevedeva 6 condizioni di sincronizzazione (-300 ms, -200 ms, -100 ms, 0, +100 ms e +240 ms). Un'ulteriore condizione sperimentale, che

costituiva la baseline, prevedeva il solo compito di esecuzione su base visiva, senza alcuno stimolo uditivo. I risultati mostrano che nelle condizioni di congruenza tra suono e stimolo visivo emergeva una facilitazione nella risposta, rispetto alla baseline, solo quando il suono precedeva di 300 o 200 ms la nota da suonare. Nessuna differenza era invece presente nelle altre condizioni di sincronizzazione. Riguardo la condizione incongruente, era presente un'interferenza, sempre rispetto alla baseline, quando il suono precedeva lo stimolo visivo di 200 o 100 ms oppure quando i due apparivano contemporaneamente. È dunque confermato il risultato di Drost e colleghi (2005a, 2005b, 2007) secondo cui l'ascolto di suoni può attivare delle rappresentazioni motorie precedentemente associate a quei suoni. Infatti, quando la nota da eseguire a la nota sentita erano le stesse (condizione congruente) c'era facilitazione, quando erano diverse (condizione incongruente) c'era interferenza. La diversa dinamica temporale che caratterizza questo effetto, ossia facilitazione rispetto a un'azione selezionata dal contesto se lo stimolo uditivo la precede di 300 ms e interferenza se l'intervallo è più breve (dai 200 ms prima), suggerisce, secondo gli autori, la presenza di due diversi meccanismi che spiegano la facilitazione e l'interferenza. In particolare, l'effetto di facilitazione sarebbe un vero e proprio effetto di interazione uditivo-motoria confermato dal fatto che 300 ms sono il tempo necessario per l'attivazione, dopo uno stimolo, della corteccia premotoria (Pizzamiglio e coll., 2005), l'effetto di interferenza sarebbe invece dovuto, prevalentemente, all'incongruenza cross-modale tra lo stimolo visivo e quello uditivo durante la conversione di questi due stimoli in piani motori. Avverrebbe dunque a un livello più percettivo che motorio.

Sia gli studi di Drost che quello di D'Ausilio e colleghi hanno indagato l'interazione uditivo-motoria dimostrando che l'ascolto di uno stimolo uditivo permette di attivare il sistema motorio. Tuttavia, se il fenomeno dell'interazione uditivo-motoria fosse realmente dovuto alla presenza di rappresentazioni comuni per aspetti percettivi e aspetti motori di un'azione (la teoria del Codice Comune vista sopra), allora ci si dovrebbe aspettare che l'esecuzione di una determinata azione influenzi la percezione di uno stimolo direttamente associato a quella stessa azione (bidirezionalità dell'effetto). Un'ipotesi di questo tipo è stata recentemente indagata in uno studio condotto da Repp e Knoblich (2009). In

questo studio gli autori hanno sottoposto due gruppi di soggetti, pianisti e non pianisti, a un semplice compito che prevedeva il giudizio riguardo l'andamento, ascendente o discendente, di due suoni prodotti dallo stesso partecipante premendo successivamente due tasti di un pianoforte. I suoni prodotti avevano due particolarità: erano posti a distanza di tritono⁴ l'uno dall'altro ed erano ambigui dal punto di vista della loro composizione spettrale. Queste caratteristiche permettevano di generare una sorta di paradosso acustico-musicale definito Tritone Paradox (Deutsch, 1986; 1987; 1991). Per chiarire brevemente cosa si intende per Tritone Paradox basti sapere che l'ascolto di due suoni successivi con queste caratteristiche genera un'indeterminazione riguardo il loro andamento melodico tale per cui alcuni soggetti percepiranno i due suoni come ascendenti e altri li percepiranno come discendenti. Questo effetto è presente sia nelle persone senza alcuna competenza musicale che nei musicisti. L'ipotesi base dello studio parte dal presupposto che solo i pianisti sappiano, dal punto di vista motorio, che premendo successivamente due tasti del pianoforte da sinistra a destra si generano due suoni che procedono verso l'acuto, e premendoli da destra a sinistra due suoni che procedono verso il grave. Dunque, se l'esecuzione di un'azione (premere successivamente due tasti del pianoforte verso destra o verso sinistra) per la quale si è appreso un determinato effetto percettivo (due suoni che procedono, rispettivamente, verso l'acuto o verso il grave) interferisce con la percezione di uno stimolo che ha caratteristiche simili a quell'effetto, allora solo i pianisti tenderanno a giudicare più spesso i due suoni con caratteristiche di Tritone Paradox (strutturalmente ambigui) come ascendenti quando li produrranno con un gesto da sinistra a destra, e come discendenti quando li produrranno con un gesto da destra a sinistra. Nessuna influenza del gesto sul giudizio è invece ipotizzabile nei soggetti non pianisti, i quali mancano di un repertorio motorio associato allo strumento e dunque di una rappresentazione dell'effetto che quel gesto produce.

⁴ La distanza tra due suoni nel sistema musicale occidentale, o sistema temperato, si misura in toni e semitoni. Questi ultimi costituiscono la distanza minima tra due suoni. In termini visivi questa distanza minima è quella che separa, sul pianoforte, un tasto nero dal tasto bianco immediatamente successivo o precedente. Ogni tono è composto da due semitoni. Il termine "tritono" si riferisce al fatto che la distanza intercorrente tra i due suoni musicali usati nell'esperimento era di tre toni.

I risultati confermavano le previsioni. Infatti solo i pianisti presentavano una chiara influenza del gesto sul giudizio riguardo l'andamento dei due suoni. Tale effetto era presente sia che i pianisti eseguissero personalmente il gesto sia che osservassero un'altra persona eseguire il gesto al posto loro. Questi risultati confermano l'ipotesi della bidirezionalità avanzata dalla teoria del codice comune, eseguire un'azione fortemente associata a uno specifico effetto sensoriale influisce sulla percezione di quell'effetto.

Gli studi comportamentali discussi permettono di definire alcuni punti chiave riguardo gli effetti di interazione uditivo-motoria nei musicisti. In primo luogo l'effetto è bidirezionale, ossia stimoli uditivi possono influenzare aspetti motori (Drost e coll., 2005a, 2005b e 2007; D'Ausilio e coll., 2010) o viceversa (Repp e Knoblich, 2009). In secondo luogo la qualità timbrica dei suoni risulta cruciale per il manifestarsi dell'effetto (Drost e coll., 2007). Infine, lo studio della dinamica temporale dell'effetto evidenzia che il completo svolgimento dei processi coinvolti richiede una finestra temporale che va dai 200 ai 300 ms, suggerendo un ruolo delle aree corticali pre-motorie (Pizzamiglio e coll., 2005; Shahin e coll., 2008).

Il quadro emerso dagli studi comportamentali passati in rassegna risulta ulteriormente avvalorato da evidenze convergenti che provengono da ricerche di elettrofisiologia e brain imaging funzionale. In uno studio condotto con la Magnetoencefalografia (MEG), Haueisen e Knösche (2001) hanno dimostrato che nei pianisti l'ascolto di una musica prodotta dal proprio strumento attiva in modo selettivo la corteccia motoria primaria. Gli autori hanno chiesto a due gruppi di partecipanti, pianisti e musicisti non pianisti, di ascoltare alcuni semplici brani eseguiti al pianoforte. Le musiche presentate erano costituite da noti brani di musica classica per i quali veniva eseguita solo la parte relativa alla mano destra (ossia la melodia fondamentale senza la parte di accompagnamento). Durante la registrazione magnetoencefalografica ai partecipanti era richiesto di ascoltare passivamente la musica. I risultati mostrano che solo nei pianisti era presente un'attivazione della corteccia motoria primaria dell'emisfero sinistro. Tale attivazione presentava inoltre una natura somatotopica, ossia

quando i pianisti ascoltavano porzioni di brano che solitamente vengono suonate con il pollice si attivava selettivamente una parte di corteccia motoria primaria che controlla i movimenti del pollice, lo stesso fenomeno era presente per il dito mignolo. Essendo il gruppo di controllo composto da musicisti non pianisti, può essere esclusa un'interpretazione basata su un processo di natura puramente astratta legato all'apprendimento della musica. È invece chiaro che l'emergere dell'effetto è strettamente legato al fatto di possedere un repertorio motorio associato al tipo di suoni che si stanno ascoltando.

Risultati compatibili sono stati ottenuti, più recentemente, in uno studio TMS condotto da D'Ausilio e colleghi (2006). Gli autori hanno chiesto a un gruppo di pianisti di studiare per cinque giorni la parte relativa alla mano sinistra di un brano musicale di media difficoltà che nessuno dei partecipanti aveva mai studiato o ascoltato prima. Attraverso la TMS e la misurazione dei Potenziali Evocati Motori (MEP) sono state rilevate la Facilitazione Intra-Corticale (ICF) e la Curva di Reclutamento dell'eccitabilità cortico-spinale (RC) elicitate durante l'ascolto del brano studiato o di un brano di controllo con caratteristiche strutturali simili ma eseguito al flauto anziché al pianoforte. La prima metodica, ICF, misura la sensibilità sinaptica dei circuiti neurali eccitatori o inibitori a livello della corteccia motoria primaria ed è associata a modificazioni anche transitorie della connettività sinaptica locale (Ziemann e coll., 1996); la seconda metodica, RC, permette una valutazione funzionale della via cortico-spinale, espressione di meccanismi coinvolti nell'apprendimento motorio a lungo termine (Ziemann e coll., 2001). Sono state condotte tre misurazioni: prima che i partecipanti iniziassero la fase di studio (T0), dopo 30 minuti (T1) di studio e dopo 5 giorni di studio (T2). I risultati mostrano che a T0 per entrambe le misure rilevate non erano presenti differenze nelle due condizioni sperimentali (brano studiato vs controllo). A T1 emergeva una chiara ICF durante l'ascolto del brano studiato. A T2 era presente sia una maggiore ICF che una maggiore RC rispetto alla condizione di controllo. Ciò suggerisce che il semplice ascolto di una melodia precedentemente studiata al pianoforte attiva le rappresentazioni motorie ad essa associate

durante la fase di studio. Tale effetto è presente, in termini di facilitazione intracorticale, già dopo 30 minuti di studio.

Una conferma e un ulteriore approfondimento dei risultati ottenuti con metodiche elettrofisiologiche sono stati raggiunti per mezzo di indagini condotte con la risonanza magnetica funzionale (fMRI). In uno studio di Bangert e colleghi (2006) è stato chiesto a due gruppi di partecipanti, pianisti e non musicisti, di eseguire alternativamente due semplici compiti, uno uditivo e uno motorio. Il compito uditivo prevedeva l'ascolto di brevi melodie a una sola voce eseguite al pianoforte, il compito motorio prevedeva invece il premere secondo una sequenza libera i tasti di una tastiera di pianoforte senza feedback uditivo. I risultati mostrano che le attivazioni corticali durante i due compiti sono profondamente diverse nei due gruppi. In particolare, i non musicisti presentano un'attivazione delle aree uditive durante il compito di ascolto e un'attivazione delle aree pre-motorie e motorie durante il compito di pressione dei tasti. I pianisti invece in entrambe i compiti presentano un complesso pattern di attivazioni che comprende tanto aree uditive quanto aree pre-motorie e motorie. Più specificamente per i pianisti emerge un network di aree corticali comune ai due compiti che comprende una porzione temporo-parietale, composta dalle BA 40-41/42-21/22, e una porzione fronto-temporale, composta dalle aree di Broadman (BA) 4-6/9-44. Tale network è situato in prevalenza nell'emisfero cerebrale sinistro e coinvolge due aree fondamentali per l'elaborazione e la produzione del linguaggio: l'area di Wernicke e l'area di Broca. Dal punto di vista funzionale appare dunque evidente che tanto l'ascolto musicale quanto l'esecuzione alla tastiera senza un feedback uditivo comporta, nei pianisti, il coinvolgimento di un network di aree deputate all'elaborazione uditiva e alla pianificazione e implementazione dei programmi motori. La sovrapposizione di questo network con aree deputate al linguaggio ha fatto ipotizzare agli autori che alcune regioni corticali solitamente associate a funzioni linguistiche possano in realtà avere un ruolo più generale in processi di interazione percettivo-motoria. Gli autori precisano inoltre che il network emerso nei pianisti risulta in parte sovrapponibile a quello emerso in precedenti studi volti a indagare la possibile presenza di un sistema di neuroni specchio visivi o audio-visivi nei musicisti (Hasegawa e coll.,

2004; Haslinger e coll., 2005). Questa sovrapposizione suggerisce che il network audio-motorio rilevato dagli autori e i network visuo-motori precedentemente emersi possano in realtà essere un unico sistema deputato all'integrazione percettivo-motoria di comportamenti complessi come il linguaggio o la musica.

4 Una teoria cognitiva per l'interazione uditivo-motoria: la Theory of Event Coding (TEC)

Le evidenze empiriche a favore di una stretta interazione fra il sistema uditivo e il sistema motorio sono ormai molte (Zatorre e coll., 2007; Aglioti e Pazzaglia, 2010). Come brevemente illustrato nel capitolo precedente, queste evidenze hanno suggerito nuove modalità di concettualizzare il rapporto tra percezione e azione. Il principio ideomotorio e la Teoria del Codice Comune costituiscono degli ottimi elementi di partenza per inquadrare, dal punto di vista cognitivo, il fenomeno dell'interazione uditivo-motoria, poiché permettono di superare il problema della "traslazione" dei codici percettivi in codici motori (Prinz, 1997). Non sono tuttavia sufficienti per spiegare i vari aspetti qualitativi coinvolti nel processo di generazione e di funzionamento di questa interazione.

Nel seguente capitolo presenterò una teoria sulla pianificazione e il controllo dell'azione che permetterà di rendere conto dei vari aspetti cognitivi coinvolti nel fenomeno dell'interazione uditivo-motoria: la Theory of Event Coding (TEC). Nei paragrafi 4.1 e 4.2 verranno delineati i concetti fondamentali di questa teoria, nel paragrafo 4.3 questo quadro teorico verrà usato per inquadrare il fenomeno dell'interazione uditivo-motoria.

4.1 Feature Code

Il nucleo concettuale della Theory of Event Coding (TEC) poggia su un principio di equivalenza funzionale tra percezione e pianificazione dell'azione in base all'assunto che entrambe sono rappresentazioni interne di eventi esterni, o meglio dell'interazione tra l'agente e gli eventi esterni (Hommel e coll., 2001). Secondo la TEC un soggetto che percepisce sta acquisendo attivamente delle informazioni riguardo se stesso e l'ambiente circostante attraverso una continua interazione agente-ambiente mediata dall'azione, similmente, un soggetto che agisce sta producendo degli eventi percettivi, nel senso che ogni azione produce una serie di effetti sensoriali che verranno da esso percepiti. In altre parole, il percepire presuppone un comportamento attivo e l'agire richiede e

produce informazione percettiva. In tal senso i due processi sono intimamente legati l'uno all'altro al punto che il percepire assume l'agire e viceversa. In questo quadro teorico non c'è una differenza sostanziale tra anticipare mentalmente un evento percettivo e pianificare un'azione oppure tra percepire un evento ed eseguire un'azione pianificata. Quest'ultima affermazione sarà più chiara se riprendiamo il principio ideomotorio il quale propone, come abbiamo visto, che le azioni volontarie siano messe in atto mediante l'anticipazione degli effetti sensoriali dell'azione (James, 1890). Simulare mentalmente un evento percettivo (l'effetto dell'azione) ci permetterebbe, secondo tale principio, di selezionare il piano motorio per poter eseguire un'azione volontaria. Questo comporta necessariamente che il prodotto ultimo della percezione e l'elemento di innesco di un'azione volontaria (il piano motorio) siano codificati e custoditi in uno stesso dominio rappresentazionale comune (Prinz, 1990; 1997). Nella letteratura sul controllo motorio questa idea del rappresentare le azioni in termini di goal dell'azione è ampiamente diffusa (Jannerod, 1999; Viviani e Stucchi, 1992). La TEC riprende questo concetto e lo amplia, ipotizzando che "effetto dell'azione" possa essere qualsiasi evento distale contingente all'azione stessa (Hommel, 1997). Per comprendere cosa gli autori della TEC intendano per "evento distale", dobbiamo introdurre due concetti cruciali nella TEC: il concetto di "Event Code" (EC) e quello di "Feature Code" (FC).

Un EC è una rappresentazione composta di un evento ed è composta da più FC. Ogni FC rappresenta una caratteristica distale di un evento. Esso integra in un'unica rappresentazione (principio del Codice Comune) input sensoriali da più sistemi percettivi (ad es. visivo, uditivo, somatosensoriale) e modula l'attività di più sistemi motori (ad es. arti superiori, inferiori). Il FC codifica le caratteristiche distali di un evento come la forma o il colore, ma anche aspetti più complessi quali le "affordance" (Gibson, 1969), ossia il fatto che un oggetto possa essere manipolato in un modo piuttosto che in un altro. Esso inoltre può integrare anche informazioni provenienti dalla memoria. Tale codifica distale si riferisce a come un evento appare nel mondo esterno (Hommel, 2009) e non ai codici neurali o ai pattern di attivazione dei sistemi sensoriali o motori mediante i quali tale evento viene rappresentato. Il fatto di codificare gli aspetti distali di uno stimolo o di un azione, anziché quelli prossimali, ha il

chiaro vantaggio di creare una rappresentazione aspecifica e multimodale e dunque più ricca rispetto a una rappresentazione prossimale che è vincolata dal numero di caratteristiche che un certo canale sensoriale o motorio è in grado di analizzare o controllare (Hommel e coll., 2001).

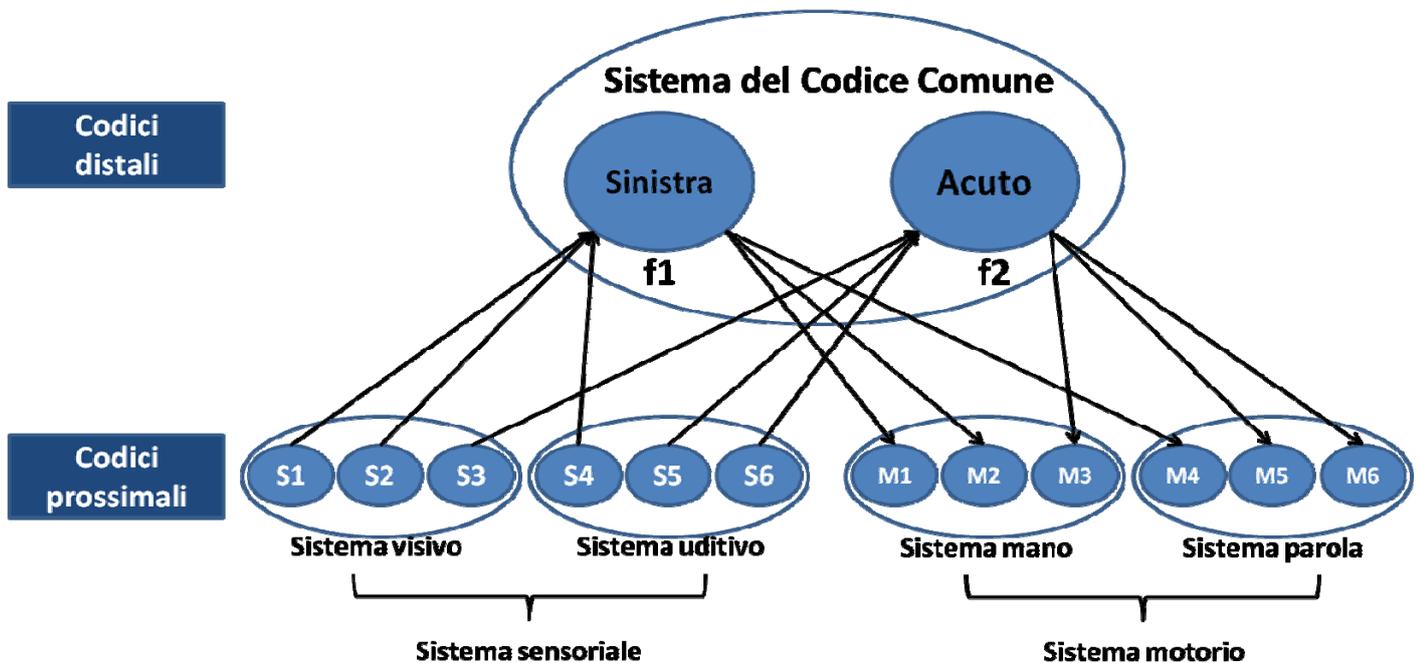


Figura 4.1. Codifica delle caratteristiche di un evento secondo la Theory of Event Coding (adattato da Hommel e coll., 2001). Vedi il testo per una descrizione dettagliata.

Una semplice esemplificazione di come avvenga il processo di codifica delle caratteristiche di un evento e di come queste vengano poi usate per il controllo dell'azione è presentato in Figura 4.1. Poniamo di star ascoltando un suono acuto prodotto da un flautista posizionato alla nostra sinistra. Assumiamo che l'integrazione delle informazioni sensoriali provenienti dal nostro sistema visivo e uditivo (S1, S2, S3 e S4, S5, S6 rispettivamente) convergano verso due rappresentazioni astratte, o FC (f1 e f2 in Figura 4.1), relative a due caratteristiche dell'evento in corso, poniamo la rappresentazione "sinistra" riferita alla posizione dello stimolo che genera il suono e la rappresentazione "acuto" riferita all'altezza del suono prodotto. Tanto le informazioni visive quanto quelle uditive permettono di specificare ognuno degli FC. Infatti, la creazione del FC "sinistra" può beneficiare sia delle informazioni di natura visiva relative alla posizione del flautista rispetto a noi (S1 e S2) sia di quelle uditive relative alla posizione della fonte sonora (S4). Allo stesso modo la

creazione del FC “acuto” beneficia sia delle informazioni uditive relative alla frequenza del suono (S5 e S6) sia di quelle visive relative al tipo di strumento che stiamo osservando (S3). In base al principio del Codice Comune visto sopra è prevista un’interazione tra sistema percettivo e sistema motorio. Dunque, percepire un evento con certe caratteristiche (in questo caso “sinistra” e “acuto”) farà da prime su quelle azioni che producono le stesse caratteristiche nel mondo esterno. Nel nostro esempio l’attività del FC f1 influenzerà il sistema motorio che controlla la mano (M1 e M2) al fine di produrre un movimento diretto a sinistra. Allo stesso modo il FC f2 influenzerà il sistema motorio deputato alla parola (M5 e M6) per produrre una parola con un tono acuto o per dire la parola “sinistra” ad alta voce.

Come vedremo nel paragrafo successivo l’integrazione di più FC riferiti a un evento genera un Event Code.

4.2 Event Code

Ogni Event Code (EC) è costituito da diversi FC che rappresentano le caratteristiche di un evento percepito o pianificato. Tuttavia la mera attivazione di più FC non genera, ipso facto, un EC. Il concetto sarà più chiaro con un piccolo esempio. Immaginiamo di percepire una piccola biglia rossa vicino a una grossa palla gialla. In questa condizione il sistema attiverà, tra gli altri, i FC “piccolo”, “tondo” e “rosso”, e “grande”, “tondo” e “giallo”. Una volta attivati tali FC il sistema deve essere in grado aggregare insieme gli FC che appartengono allo stesso evento (nell’esempio quelli della biglia e quelli della palla) separando, di conseguenza, quelli che appartengono a eventi diversi. Tale operazione richiede un sistema di integrazione che, nel caso della percezione visiva, comporta il coinvolgimento di processi attentivi e un’attivazione sincronizzata dei FC che appartengono allo stesso oggetto (Treisman, 1996; 1998). Il problema dell’integrazione si pone ovviamente anche per la pianificazione delle azioni, ed è stato dimostrato che il processo di integrazione avviene in modo simile a quanto avviene nella percezione visiva anche nel caso della pianificazione dell’azione (Stoet e Hommel, 1999).

La generazione di un EC avviene in due fasi. Nella prima fase si ha l'attivazione di diversi FC legati all'evento in corso. Nella seconda fase un processo di integrazione lega insieme in modo coerente i FC appartenenti a uno stesso evento, generando così un EC. Dato il principio del codice comune, tale dinamica influenza tanto la percezione quanto la pianificazione delle azioni, perché entrambe vengono rappresentate mediante eventi distali.

Un EC viene generato sulla base dei vincoli e del goal posti dal compito cognitivo in corso. Solo i FC più adeguati a ottenere un risultato positivo nel compito in corso verranno selezionati quali "mattoni di base" di un EC. Se un FC risulta fondamentale per un determinato compito, il suo livello di pre-attivazione sarà più alto rispetto ad altri FC parimenti coinvolti ma meno rilevanti per il compito in corso. Se durante il compito di elaborazione di un evento o pianificazione di un'azione il FC pre-attivato viene effettivamente selezionato, il suo livello di attivazione sarà necessariamente più alto rispetto ad altri FC presenti ma irrilevanti per il compito. I FC maggiormente attivati dal compito avranno un ruolo rilevante nel processo di integrazione volto a creare un EC.

Quello appena descritto viene definito dagli autori della TEC "principio della pesatura delle caratteristiche". Essi ipotizzano che un fattore chiave per la selezione dei FC da "pesare" sia la rilevanza di un certo FC rispetto al compito. In riferimento alla percezione di un evento tale meccanismo può essere visto come un processo attentivo che prepara selettivamente il sistema cognitivo a elaborare in modo diverso caratteristiche rilevanti o irrilevanti di un evento. In riferimento alla pianificazione di un'azione lo stesso meccanismo può essere inteso come un processo intenzionale che prepara il sistema cognitivo a produrre un determinato evento.

Come visto più sopra, le caratteristiche codificate in un EC si riferiscono tanto ad aspetti percettivi quanto ad aspetti legati alla pianificazione dell'azione. Tale assunto si basa sul concetto di Codice Comune e permette di ipotizzare la presenza di una serie di effetti di facilitazione e interferenza tra percezione e azione. È stato dimostrato che integrare nel piano di un'azione un certo codice spaziale compromette tanto la pianificazione di un'altra azione quanto l'integrazione di un evento percettivo

che richiedono quello stesso codice spaziale (Müsseler e Hommel, 1997a; 1997b). Similmente, integrare un codice spaziale a un evento percettivo e mantenere nella memoria di lavoro tale evento influenza la velocità delle risposte prodotte con azioni che condividono il medesimo codice spaziale (Stoet e Hommel, 2002). Questi effetti di interazione tra percezione e pianificazione dell'azione suggeriscono la condivisione dei codici usati per rappresentare mentalmente le caratteristiche degli eventi elaborati nei due domini, confermando, di fatto, gli assunti della teoria del Codice Comune.

4.3 TEC e interazioni uditivo-motorie

L'esecuzione di alcune azioni prevede la produzione di suoni specifici. Si pensi a titolo di esempio ad azioni quali battere le mani, fischiare o schiacciare le dita. Questi gesti sono chiaramente riconoscibili non solo quando osserviamo un'altra persona che li compie ma anche quando ascoltiamo, senza guardare, qualcuno che li sta eseguendo. Come visto nel capitolo precedente, il semplice ascolto di suoni per i quali si possiede un repertorio motorio attiva le rappresentazioni motorie associate all'esecuzione dei gesti necessari per produrre quel tipo di suoni. Questa evidenza sperimentale risulta chiaramente inquadrabile all'interno della Theory of Event Coding.

Uno dei concetti chiave della TEC è che la percezione e la pianificazione delle azioni si basano su una rappresentazione comune (sistema del Codice Comune) che ha come contenuto le caratteristiche distali di un evento (Hommel e coll., 2001). Attraverso l'esperienza di una sistematica associazione tra una specifica azione e il suo effetto sensoriale si genererebbe automaticamente a livello di Codice Comune una rappresentazione che lega insieme il piano motorio di un'azione e l'effetto sensoriale ad essa associato (rappresentazione azione-effetto o RapA-E) (Elsner e Hommel, 2001). La contiguità temporale e la contingenza tra azione ed effetto sensoriale sono fattori di cruciale importanza in questo processo (Elsner e Hommel, 2004). Data la natura duplice delle rappresentazioni contenute a livello del sistema del Codice Comune, è immaginabile che una volta acquisita una RapA-E il richiamare uno dei due aspetti di tale rappresentazione (l'aspetto percettivo, ad esempio) riattivi immediatamente anche l'altro (l'aspetto relativo al piano d'azione). Poniamo che un soggetto abbia

appreso la seguente relazione: premo il tasto destro e ottengo un suono acuto, premo il tasto sinistro e ottengono un suono grave. Tale apprendimento genererà una RapA-E che lega gli aspetti sensoriali del suono (acuto o grave) con il piano motorio usato per produrlo (premo destra o sinistra). Se successivamente chiederò al soggetto di premere alternativamente il tasto destro o il sinistro in risposta a uno stimolo visivo e contestualmente assocerò allo stimolo visivo un suono che può essere acuto o grave, il soggetto dovrebbe rispondere più velocemente nelle condizioni congruenti con il precedente apprendimento (suono acuto-premo destra vs suono grave-premo sinistra) rispetto alle incongruenti (suono acuto-premo sinistra vs suono grave-premo destra). Similmente, se successivamente alla fase di apprendimento chiederò al soggetto di pianificare il gesto di premere il tasto destro o il sinistro e prima di eseguire il gesto gli chiedo di rispondere a uno stimolo uditivo acuto o grave, egli dovrebbe essere più veloce nella detezione del suono acuto quando pianifica l'azione di premere il tasto destro e del suono grave quando pianifica l'azione di premere il tasto sinistro. Le ipotesi del primo scenario sono state direttamente confermate a livello sperimentale (Hommel, 1998; Elsner e Hommel, 2001) quelle del secondo con l'uso di paradigmi alquanto sovrapponibili a quello illustrati (Müsseler and Hommel, 1997a; Repp e Knoblich, 2009). Ciò dimostra che una volta appresa la relazione tra azione ed effetto sensoriale dell'azione ogni elemento di questa diade può funzionare da prime per selezionare l'altro.

Alla base delle interazioni uditivo-motorie ci potrebbero dunque essere delle RapA-E apprese nel corso della propria esperienza. Tali rappresentazioni sarebbero funzionali al controllo delle azioni, permetterebbero infatti di selezionare quei piani motori necessari a produrre un certo effetto uditivo. Data la natura di queste RapA-E, l'attivazione delle rappresentazioni motorie su stimolo uditivo si configura come una sorta di effetto priming legato al fatto che gli aspetti percettivi e motori di una determinata azione, entrambi codificati in termini distali, sono sovrapposti a livello rappresentazionale (Codice Comune) quasi fossero due facce della stessa medaglia. Richiamare uno dei due elementi attiva di fatto anche l'altro. Dal punto di vista neurofisiologico, la presenza di

neuroni con proprietà mirror nella corteccia cerebrale dei primati costituisce una forte evidenza convergente delle ipotesi avanzate dalla TEC.

5 Introduzione alla parte sperimentale

Gli studi sperimentali presentati in questo lavoro indagano due aspetti separati dell'elaborazione della musica. Una prima parte (compresa nei capitoli che vanno dal sesto al nono) riguarda una ricerca condotta allo scopo di valutare se il parametro dell'altezza del suono elicit, nei pianisti, fenomeni di interazione uditivo-motoria. Una seconda parte (il capitolo 10) presenta uno studio di brain imaging funzionale che ha l'obiettivo di chiarire le basi neurali dell'elaborazione di diverse sottocomponenti del ritmo musicale. In questa sezione viene presentata una breve introduzione a entrambe le ricerche allo scopo di fornire degli elementi di base per interpretare i risultati presentati successivamente.

5.1 L'elaborazione dell'altezza del suono nei pianisti: interazione uditivo-motoria e possibili componenti spaziali

L'altezza è una delle caratteristiche principali del suono. Essa indica se un suono prodotto è acuto o grave ed è una proprietà che permette di organizzare i suoni lungo una scala. Dal punto di vista fisico l'altezza viene misurata in base alla frequenza dell'onda sonora che ha generato il suono (cicli per secondo, o Hertz). Al crescere della frequenza cresce l'altezza del suono. Nei suoni prodotti da strumenti musicali l'altezza percepita corrisponde alla frequenza fondamentale del suono. Infatti, a meno che un suono non sia un tono puro la sua composizione spettrale comprende diverse frequenze "impastate" tra loro. Questo impasto contribuisce a creare le caratteristiche timbriche tipiche di un certo strumento.

La dimensione dell'altezza del suono ha una grande rilevanza dal punto di vista musicale, infatti è attorno ad essa che la gran parte delle culture ha creato dei sistemi musicali organizzati. Tali sistemi musicali si basano su sequenze di suoni di diversa altezza definite scale. Senza entrare troppo nel merito, si può definire una scala musicale come uno schema di riferimento le cui proprietà permettono di generare una varietà infinita di possibili melodie. Una tipica scala musicale che tutti, almeno dal punto di vista lessicale, abbiamo imparato a scuola è la seguente: DO, RE, MI, FA, SOL,

LA, SI, DO⁵... Questa non è altro che un esempio di scala maggiore diatonica del sistema tonale occidentale ed è solo una delle tante possibili scale esistenti. Una brevissima analisi delle sue caratteristiche ci permetterà di estrarre alcuni elementi di base comuni a molte scale musicali.

Un primo e fondamentale elemento è il fatto che la sequenza ad un certo punto si ripete. Infatti il primo suono (DO) riappare alla fine della sequenza. La differenza tra il primo e l'ottavo suono è che quest'ultimo è più acuto del primo. In termini tecnici la distanza, espressa in intervalli, che separa i due suoni viene chiamata "ottava" e i due suoni si dicono a distanza di ottava o uno all'ottava superiore rispetto all'altro (vedi Károlyi 1969 per un approfondimento). Dal punto di vista percettivo questi due suoni sono molto consonanti e, a parte la diversa altezza, risultano qualitativamente molto simili rispetto a due suoni della stessa scala più vicini tra loro (ad esempio DO e LA). Questa similarità, o consonanza, percettiva è legata a una proprietà fisica dei due suoni, ossia al fatto che in termini di frequenza il rapporto tra i due suoni è di 1:2. In altre parole la frequenza in Hertz di un suono all'ottava superiore è doppia rispetto al medesimo suono all'ottava inferiore. Il fatto che i suoni di una scala musicale si distribuiscano all'interno di un intervallo di ottava e che poi la medesima sequenza si ripeta all'ottava superiore è una caratteristica tipica di tutte le scale musicali note ed è legata, probabilmente tanto ad aspetti legati alla fisica del suono quanto alla modalità con cui il sistema percettivo umano elabora questa caratteristica del suono (Patel, 2008).

Un secondo elemento che caratterizza una scala musicale è il numero di suoni che la compongono. La scala usata come esempio è formata da 7 suoni, esclusa la ripetizione del DO. Buona parte delle scale conosciute è composta da un numero di suoni che vanno da 5 a 7 (Nettl, 1956). I suoni che compongono la scala sono solitamente separati da un intervallo compreso tra 1 e 3 semitoni (il semitono è l'unità di misura con cui in musica si esprime la distanza minima tra due suoni, un'altra unità di riferimento è il tono, composto da due semitoni).

⁵ Questo tipo di denominazione delle note musicali viene tipicamente usato nei paesi con lingue neolatine. Nei paesi anglosassoni le note da DO a SI vengono nominate con le seguenti lettere alfabetiche: C, E, F, G, A, B.

Un ultimo elemento di rilievo riguarda il fatto che la gran parte delle scale musicali è composta da una sequenza di suoni separati da intervalli di diversa grandezza. Ad esempio, la sequenza di toni e semitoni della scala sopra citata è: 2 toni, 1 semitono, 3 toni, 1 semitono. Quest'ultimo è lo schema di tutte le scale maggiori diatoniche del sistema tonale, e indica che i primi tre suoni sono separati da un intervallo di tono, il terzo e il quarto da un semitono, il quarto, il quinto, il sesto e il settimo da un tono e il settimo e l'ottavo da un semitono. Applicando questo schema a partire da qualsiasi suono si otterrà una scala maggiore diatonica.

Il fatto che la percezione dell'altezza dei suoni comporti tanto una dimensione di natura continua, legata al variare dell'altezza percepita dal grave all'acuto, quanto una dimensione di natura categoriale, connessa al fatto che due suoni a distanza di ottava sono percepiti come più simili rispetto a due suoni più vicini in termini di distanza intervallare, ha spinto alcuni studiosi (Shepard 1982) a proporre una rappresentazione geometrica della modalità con cui l'essere umano percepisce l'altezza del suono (vedi Figura 5.1). In questa rappresentazione vengono chiaramente definite le due caratteristiche precedenti, la prima in termini di "Height" e la seconda in termini di "Chroma".

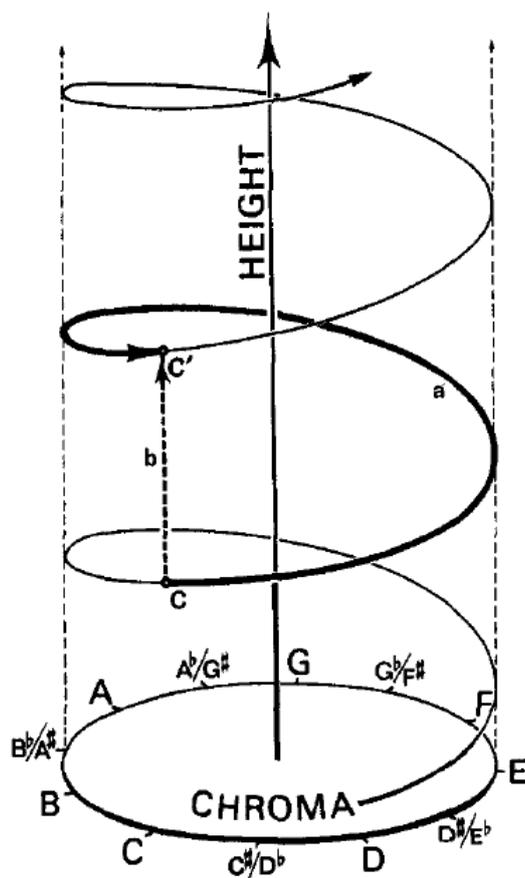


Figura 5.1. Rappresentazione elicoidale della modalità di percezione dell'altezza del suono (da Shepard, 1982). Le lettere da A a G indicano i nomi delle note (da LA a SOL) secondo il sistema di notazione anglosassone (vedi il testo per ulteriori dettagli).

I diversi suoni dal grave (base della figura) all'acuto si distribuiscono lungo la spirale ascendente. Una volta completata la sequenza di suoni compresa all'interno di un'ottava (in questo caso 12 suoni pari ai dodici semitoni in cui l'ottava viene divisa nel sistema tonale occidentale) la sequenza si ripete all'ottava più alta e così via. Procedendo verso l'alto tutti i suoni a distanza di ottava (C , c e c' nella figura 5.1) si trovano su una stessa linea verticale ideale (le linea tratteggiata marcata con b nella figura 5.1). In questo modo la distanza tra due suoni viene espressa sia in termini di posizione lungo la spirale sia in termini di posizione lungo la linea verticale ideale che collega tra loro i suoni a distanza di ottava. Questa modalità di rappresentazione rende conto del fatto che due suoni a distanza di ottava vengono percepiti come più simili rispetto a due suoni di distanza inferiore (ad esempio di settima). Tale fenomeno viene espresso in termini di distanze lungo la spirale e distanze lungo l'asse verticale (Shepard, 1982).

Come illustrato nel capitolo 2, l'elaborazione dell'altezza del suono avverrebbe tramite uno specifico modulo che selettivamente si occupa di analizzare questa proprietà (Peretz e Coltheart, 2003). Dal punto di vista della modalità di rappresentazione mentale di questa dimensione del suono, è stato proposto che il sistema cognitivo “traduca” l'altezza del suono in coordinate spaziali (Rusconi e coll. 2006). Storicamente il primo a testare questa idea con una metodologia sperimentale fu Pratt (1930). Egli fece ascoltare a un gruppo di soggetti cinque suoni di diversa altezza chiedendo loro di posizzionarli idealmente lungo una linea numerata orientata verticalmente. I risultati mostrano che tutti i soggetti disponevano i cinque suoni in senso verticale dal grave all'acuto. Risultati analoghi sono stati replicati successivamente anche con bambini e soggetti non vedenti (Roffler e Butler, 1968a, 1968b).

Un chiaro limite delle ricerche sopra menzionate riguarda il paradigma sperimentale usato. I soggetti venivano espressamente invitati a “posizionare” i suoni lungo una linea verticale presentata visivamente (o per via tattile nel caso dei soggetti non vedenti) e questo non permette di valutare se il risultante mapping dell'altezza del suono fosse spontaneo oppure indotto.

Più recentemente alcuni studiosi, usando un paradigma sperimentale definito Stimulus Response Compatibility (SRC), hanno mostrato che un mapping verticale dell'altezza del suono emerge anche in compiti che non richiedono espressamente di posizionare un suono nello spazio (Walker e Ehrestein, 2000; Rusconi e coll., 2006). In particolare, lo studio di Rusconi e colleghi (2006) mostra che in un compito di discriminazione di timbro, in cui i soggetti devono premere alternativamente con la mano destra o sinistra due tasti posti di fronte a loro lungo un'ideale linea verticale parallela al piano, le risposte ai suoni acuti sono più veloci quando date con il tasto superiore mentre quelle ai suoni gravi sono più veloci quando date con il tasto inferiore. Nel caso di soggetti musicisti l'associazione è presente anche per le risposte date con tasti posizionati a destra e sinistra del soggetto e l'associazione emersa prevedeva risposte più veloci per le associazioni destra/acuto e sinistra/grave. Risultati simili sono stati ottenuti da Lidji e colleghi (2007). Tanto l'associazione

verticale (presente sia nei non-musicisti che nei musicisti) quanto l'associazione orizzontale (presente nei soli musicisti) vengono interpretate dagli autori come l'evidenza che a livello mentale l'altezza del suono viene rappresentata in termini spaziali. Tuttavia, un aspetto cruciale tanto dello studio di Rusconi e colleghi quanto di quello di Lidji e colleghi è che la gran parte dei musicisti coinvolti erano pianisti. L'altezza del suono sulla tastiera del pianoforte è organizzata lungo l'asse orizzontale con i suoni più gravi posti a sinistra e quelli più acuti posti a destra. Tale conformazione porta un pianista ad eseguire i suoni acuti prevalentemente con la mano destra e i suoni gravi prevalentemente con la mano sinistra. Come illustrato nel paragrafo dedicato all'ascolto musicale da parte di musicisti (2.3 L'ascolto esperto) e come ulteriormente approfondito nella parte dedicata all'interazione uditivo-motoria, l'apprendimento di un determinato repertorio motorio cui si associano degli effetti di natura sensoriale porta il sistema motorio ad attivarsi durante l'elaborazione di stimoli uditivi precedentemente appresi come effetto di un'azione. Dunque, l'associazione orizzontale emersa negli studi citati potrebbe in realtà essere l'espressione di un fenomeno di interazione uditivo-motoria appresa da un pianista nel corso della propria esperienza di studio.

L'obiettivo della ricerca presentata di seguito (capitoli da 6 a 10) è di valutare se l'elaborazione dell'altezza del suono da parte di pianisti produca effetti di interazione uditivo-motoria compatibili con il mapping "gesto sulla tastiera"/"altezza del suono prodotto" appreso da questi musicisti nel corso della propria esperienza (capitolo 6). I risultati di questo studio vengono interpretati nella cornice teorica offerta dalla Theory of Event Coding (Hommel e coll., 2001). Successivamente (capitoli da 7 a 9) vengono presentati una serie di esperimenti di controllo volti a integrare i risultati ottenuti nella prima indagine. In questi tre ulteriori studi ci si è posti l'obiettivo di valutare la dinamica temporale dell'effetto emerso nel primo studio (capitolo 7) e l'eventuale coinvolgimento di rappresentazioni di natura spaziale (capitoli 8 e 9). Nel complesso i risultati permettono di delineare un quadro composito relativo all'elaborazione dell'altezza del suono nei pianisti. Tale quadro viene riassunto nel capitolo 10.

5.2 L'elaborazione del ritmo musicale: basi neurali delle diverse sottocomponenti del ritmo

Il ritmo è il susseguirsi di una serie di accenti dai quali emerge una struttura regolare e ripetitiva. In termini musicali il ritmo può essere definito come la disposizione nel tempo di suoni di diversa durata entro strutture ripetitive di accenti forti e accenti deboli. Quest'ultima definizione sottolinea due elementi chiave del concetto di ritmo in musica: il concetto di *Pattern* e il concetto di *Metro*. Ogni melodia, infatti, si caratterizza, dal punto di vista ritmico, per la specifica durata di ogni suono che la compone e per la sequenza di accenti forti e deboli entro cui tali suoni si organizzano. Queste due caratteristiche sono, appunto, il Pattern e il Metro di quella melodia. Un ulteriore elemento che entra in gioco nell'analisi delle componenti ritmiche di una melodia è il *Tempo*, inteso come la velocità a cui una melodia viene prodotta o come le variazioni di velocità che la caratterizzano.

Un aspetto importante del Pattern ritmico è il suo riferirsi alla durata relativa dei singoli suoni che lo compongono piuttosto che alla loro durata assoluta. Infatti, l'elemento fondamentale per definire un determinato pattern ritmico è il rapporto reciproco, o Rapporto Seriale (Jones, 1976), che esiste fra le durate dei diversi suoni. Questa caratteristica permette di riconoscere il pattern ritmico di una determinata melodia appresa anche quando questa viene eseguita a una velocità maggiore o minore rispetto allo standard (Tan e coll. 2010). In questo senso il Pattern è una proprietà relazionale dei suoni che compongono una melodia, e come tale non si modifica se l'intera struttura viene eseguita a velocità diverse.

Sebbene il Pattern consista in una struttura basata sul rapporto seriale tra le durate dei suoni di una melodia, non tutti i tipi di rapporti seriali vengono percepiti come ritmici. Infatti, solo i rapporti semplici (ad es. 1:1, 1:2, 1:3, ecc) vengono sperimentati da un ascoltatore come ritmici. Inoltre, vi è la tendenza a percepire in modo categoriale i rapporti seriali che compongono un Pattern. Clarke (1987) ha dimostrato che l'ascolto di suoni con rapporti seriali compresi tra 1:1 e 1:2 vengono percepiti come appartenenti all'uno o all'altro estremo anche se i rapporti seriali che li compongono

sono molto più complessi. Gli ascoltatori percepivano una sorta di confine categoriale che separava questi due tipi di rapporto seriale (vedi anche Temperley, 2001).

Intuitivamente, il Metro consiste in quella pulsazione che tendiamo a battere con il piede o con le mani quando stiamo ascoltando una musica. Questo semplice esempio permette di comprendere la natura di organizzatore sovra-ordinato della struttura ritmica che il Metro possiede. Quando battiamo la musica col piede ogni singolo battito non corrisponde mai a ogni singolo suono della melodia (ossia non stiamo battendo il Pattern ritmico), ma entro ogni battito sono compresi più suoni. Se così non fosse sarebbe sostanzialmente impossibile battere il tempo quando si ascoltano brani musicali eseguiti ad alta velocità e che contengono molte note. Ogni pattern ritmico può essere organizzato all'interno di una struttura metrica, ossia una struttura ripetitiva di pulsazioni entro cui si possono distinguere accenti forti e deboli. L'alternanza di accenti forti e deboli permette, a livello percettivo, di strutturare la sequenza di pulsazioni in raggruppamenti che, nella musica tonale occidentale, sono prevalentemente binari (Marcia) o ternari (Valzer). Altre culture musicali, come quella indiana, o la musica colta contemporanea sfruttano strutture metriche più complesse. Solitamente l'accento forte marca l'inizio di ogni raggruppamento, ed è seguito da uno o più accenti deboli.

Ma come emerge la struttura metrica di un brano? Alcuni autori sostengono che i primi elementi del pattern ritmico di un brano musicale contribuiscono a formare un contesto utile a generare la percezione del Metro (Longuet-Higgins e Lee, 1982). Tale ipotesi suggerirebbe che sia il pattern ritmico a generare la percezione del metro. Esistono tuttavia studi più recenti che dimostrano come la generazione mentale volontaria di un particolare metro (Palmer e Krumhansl, 1990) o la precedente esposizione a uno specifico metro (Desain e Honing, 2003) possa influenzare l'interpretazione di pattern ritmici. Tale riscontro è particolarmente accentuato nel caso dei musicisti, verosimilmente a causa di una maggiore familiarità con le strutture metriche musicali. La struttura metrica sembra inoltre influenzare la complessità percepita di un pattern ritmico (Povel e Essens, 1985). Infatti, la sovrapposizione di strutture metriche diverse allo stesso pattern ritmico può modificare l'accuratezza

con cui si memorizza o riproduce quel pattern. In particolare, un fattore cruciale sembra essere l'allineamento dell'onset di alcune note del pattern con gli accenti forti della struttura metrica, ossia con quei marcatori che segnano il confine tra i diversi cicli ripetitivi della struttura metrica. Se l'onset dei suoni che compongono il pattern ritmico tende a cadere sugli accenti deboli, il pattern verrà percepito come più complesso rispetto alla condizione in cui essi cadono prevalentemente sugli accenti forti.

Concettualmente Ritmo e Tempo sono indipendenti tra loro. Come illustrato più sopra un Pattern ritmico è definito in termini di rapporto reciproco che esiste fra le durate dei diversi suoni che lo compongono. Il Tempo invece si riferisce alla velocità con cui un certo Pattern ritmico procede. Un modo semplice di concettualizzare il Tempo musicale è quello di intenderlo come la velocità della pulsazione con cui un ascoltatore tende a battere il piede seguendo la musica. È stato dimostrato che un ascoltatore tende a mantenere questa pulsazione intorno ai 100 battiti per minuto (una pulsazione ogni 600 ms) anche quando esistono delle fluttuazioni nella velocità con cui un brano è eseguito (Parncutt, 1994). Questa preferenza fu individuata per la prima volta da Paul Fraisse (1982) il quale rilevò che c'è un'alta consistenza intra-individuale in compiti di tapping in cui la richiesta è semplicemente di battere la mano su un piano alla velocità che sembra più confortevole. L'autore notò inoltre che tale velocità correlava altamente con la tipica velocità di cammino dei soggetti indagati. Infine, Fraisse notò che se ai soggetti veniva richiesto di battere la mano più velocemente o più lentamente essi tendevano a produrre pulsazioni secondo un rapporto di 2:1 rispetto alla pulsazione preferita. Un aspetto in parte legato a quest'ultimo riguarda il rapporto tra Tempo e percezione del ritmo. Alcuni studi (Drake e Botte, 1993; London, 2004) hanno dimostrato che si tende a percepire come ritmiche delle sequenze di suoni in cui la distanza temporale tra un suono e l'altro cade entro un range compreso tra 200 ms (300 battiti per minuto) e 1000 ms (60 battiti per minuto). Nel caso di durate inferiori ai 200 ms i singoli elementi sono percepiti come cluster di suoni (ed es. accordi), al di sopra dei 1000 ms come eventi separati (vedi Figura 5.2).

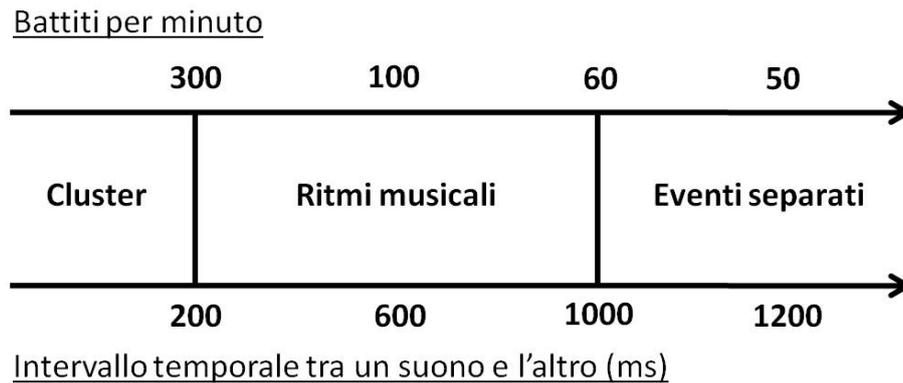


Figura 5.2. Percezione degli elementi di una sequenza di suoni in funzione della loro durata (adattato da Tan e coll., 2010). La scala numerica superiore misura il tempo musicale in termini di Battiti per minuto, la scala inferiore in termini di Intervallo temporale tra un suono e l'altro espresso in ms.

Come illustrato nel capitolo 2 (Modularità delle funzioni cognitive e mente musicale), diversi studi su pazienti con lesioni cerebrali focali hanno dimostrato l'esistenza di una doppia dissociazione tra elaborazione delle componenti melodiche ed elaborazione delle componenti ritmiche (Peretz e Coltheart, 2003). Focalizzandosi sugli aspetti ritmici, un'ulteriore dissociazione funzionale è stata individuata tra l'elaborazione del Pattern ritmico e l'elaborazione del Metro (Liégeois-Chauvel e coll., 1998; Peretz, 1990).

In merito alle basi neurali preposte all'elaborazione delle componenti ritmiche della musica, alcuni studi su pazienti suggeriscono che l'elaborazione del Pattern ritmico sia lateralizzata a sinistra (Robin e coll., 1990; Samson e coll., 2001) altri non hanno evidenziato questo tipo di lateralizzazione (Peretz, 1990; Shuppert e coll., 2000). Il lobulo parietale inferiore sembrerebbe essere coinvolto nell'elaborazione di questa componente (Di Pietro e coll., 2004). Anche per l'elaborazione del Metro, ambito in cui la letteratura su pazienti è molto scarsa, non sembra emergere alcuna lateralizzazione funzionale (Liégeois-Chauvel e coll., 1998). Sembra tuttavia che il giro temporale superiore e i gangli della base contribuiscano all'elaborazione del Metro musicale (Liégeois-Chauvel e coll., 1998; Grahn e Brett, 2009).

Nell'ambito degli studi di neuroimmagine riguardanti l'elaborazione e la comprensione del ritmo musicale c'è un quasi totale accordo riguardo al fatto che la sua analisi coinvolga, a livello corticale, tanto aree deputate all'elaborazione degli stimoli acustici quanto aree implicate nella programmazione ed esecuzione motoria (Chen e coll., 2008). Le ricerche in questo ambito si sono rivolte quasi unicamente allo studio di due sole componenti, il pattern ritmico e il metro, e nessuno studio finora ha sistematicamente manipolato questi due parametri nello stesso disegno sperimentale. Infatti, la totalità degli studi di neuroimmagine sinora condotti si sono concentrati, selettivamente, sull'una o sull'altra componente con un evidente vantaggio degli studi rivolti allo studio del pattern ritmico. I risultati mostrano che l'elaborazione di pattern ritmici attiva un network di aree che comprende la corteccia frontale inferiore, l'area pre-motoria e motoria supplementare e il cervelletto (Platel e coll., 1997; Limb e coll., 2006; Chen e coll., 2008; Bengtsson e coll., 2009). Da questi risultati appare evidente il contributo delle aree motorie nell'elaborazione del pattern ritmico musicale, tuttavia alcuni autori mostrano che questo contributo sembra diminuire all'aumentare dell'expertise musicale (Limb e coll., 2006). Infatti, nel caso dei musicisti, l'elaborazione del pattern musicale sembrerebbe coinvolgere maggiormente un network temporo-parieto-frontale lateralizzato a sinistra e in parte sovrapponibile al sistema alla base delle funzioni linguistiche. Riguardo l'elaborazione del metro musicale, nei pochi studi presenti emerge un accordo riguardo il coinvolgimento della corteccia frontale inferiore (Levitin e Menon, 2005; Grahn e Brett, 2007; Bengtsson e coll., 2009). Meno chiaro è invece il ruolo delle cortecce motorie o l'eventuale presenza di una lateralizzazione.

Lo studio descritto nella sezione successiva (capitolo 7) è volto a indagare in modo più completo la neuroanatomia funzionale legata alla rappresentazione mentale del ritmo musicale. In particolare, il nostro obiettivo è quello di isolare e comparare le basi neurali che sottostanno all'elaborazione del metro, del ritmo e del tempo. L'enfasi è posta su stimoli musicali naturali con caratteristiche presenti universalmente in tutte le culture, piuttosto che in stimoli isocronici o sequenze ritmiche non

musicali. Inoltre, il nostro obiettivo è di caratterizzare questi sottosistemi a diversi livelli di competenza musicale, sia in musicisti che in non-musicisti, con compiti comparabili tra loro.

6 L'elaborazione dell'altezza del suono nei pianisti: il ruolo dell'interazione uditivo-motoria e spaziale

6.1 Implicit chord processing and motor representation in pianists (Esperimento 1)

6.1.1 Premessa

L'esperimento 1 è stato recentemente pubblicato sulla rivista *Psychological Research* (Trimarchi e Luzzatti, 2010) e viene dunque presentato nella stessa versione. Pertanto, a differenza degli altri esperimenti che compongono questo lavoro, il testo è in lingua inglese anziché in italiano. È stato inoltre mantenuto il format del manoscritto originale.

"With kind permission from Springer Science+Business Media: Psychological Research, Implicit chord processing and motor representation in pianists, 2010, DOI 10.1007/s00426-010-0292-5, Trimarchi P.D. and Luzzatti C., figure numbers: 3". <http://www.springerlink.com/content/101575/>

Implicit chord processing and motor representation in pianists

Pietro Davide Trimarchi & Claudio Luzzatti

Department of Psychology, University of Milano-Bicocca, Milan, Italy

Corresponding Author:

Pietro Davide Trimarchi,
Department of Psychology,
University of Milano-Bicocca,
Piazza dell'Ateneo Nuovo 1; I-20126 Milano, Italy
Phone: (+39) 02-6448-3775; Fax: (+39) 02-6448-3706
E-mail: p.trimarchi@campus.unimib.it

Abstract

The aim of this paper is to assess the relevance of pitch dimension in auditory-motor interaction. Several behavioral and brain imaging studies have shown that auditory processing of sounds can activate motor representations, an effect which is however elicited only by action-related sounds, i.e., sounds linked to a specific motor repertoire. Music provides an appropriate framework for further exploration of this issue. Three groups of participants (pianists, non-pianist musicians and non-musicians) were tested with a shape decision task where left-hand and right-hand responses were required; each visual stimulus was paired with an auditory task-irrelevant stimulus (high-pitched or low-pitched piano-timbre chords). Of the three groups, only pianists had longer reaction times for left-hand/high-pitched chords and right-hand/low-pitched chords associations. These findings are consistent with an auditory-motor effect elicited by pitch dimension, as only pianists show an interaction between motor responses and implicit pitch processing. This interaction is consistent with the canonical mapping of hand gestures and pitch dimension on the piano keyboard. The results are discussed within the ideo-motor theoretical framework offered by the Theory of Event Coding (Hommel et al., 2001. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849–937).

Keywords: music, auditory-motor interaction, pitch

6.1.2 Introduction

Performing music requires close interplay between the auditory and the motor systems (Pfordresher 2006). When a musician performs an action on his instrument, by moving his fingers over a piano keyboard for example, an effect is produced (in this case, piano sounds); his ultimate aim in performing the action is to exploit the action-effect relationship to produce melodies and chords. This study focuses on this relationship in pianists.

The nature of the relationship between actions and action effects at a representational level was conceptualized by Hommel and colleagues (2001) in a theoretical framework defined as the Theory of Event Coding (TEC). The core contention of this hypothesis is that “codes of perceived events (e.g. action effect) and planned actions share a common representational domain, to the effect that perceptual codes and action codes may prime each other on the basis of their overlap in this domain” (Hommel et al., 2001, p. 850). The concept of “common representational domain”, or “common code” (see also Prinz, 1997; Hommel, 2009), plays a key role in the ideo-motor principle at the basis of the TEC; the anticipation of a goal, in terms of action effects, helps to select and plan a voluntary action. A specific brain basis has been proposed for this ideo-motor principle (Melcher et al. 2008). The emergence of an integration between perceptual codes (action effects) and action codes (motor representations) at the level of a common representational domain, an essential process for a voluntary control of actions, is an acquired phenomenon resulting from repeated and contingent action-effect experiences (Elsner & Hommel, 2001).

According to TEC, stimuli experienced as action effects may thereafter activate the associated action (see Hommel, 2009 for a review). Several studies suggest that this is the case, in terms of auditory-motor interactions (Zatorre et al. 2007), for musicians during music processing (Drost et al. 2005a; Drost et al. 2005b; Drost et al. 2007; Keller and Koch 2006a, 2006b, 2008). Drost and co-workers (2005b) found that action representations are activated in pianists when they perceive piano chords. Their participants (pianists vs. non-musicians) were required to play chords on a piano

keyboard in response to visual stimuli. Auditory task-irrelevant stimuli, congruent or incongruent with action effects (e.g., a C major chord visual stimulus coupled with a C major or a C minor chord auditory stimulus), were presented concurrently. The results showed that only the pianists had slower response times when the auditory stimuli were incongruent with the required response. In a more recent study, Drost and colleagues (2007) obtained complementary results to those obtained in their previous study. The task used was similar to the earlier task, but the auditory stimuli were presented as five different timbres; pianists had slower RTs only for incongruent conditions with piano or organ timbres and guitarists only for guitar timbres (guitar fingerboards were used as a response device). This clearly suggests that, for musicians only, action representations are activated when musical sounds (action effects) are processed and more specifically, this effect emerges when musicians process sounds generated by their own instrument. A magnetoencephalography (MEG) study conducted by Haueisen and Knosche (2001) provided neurophysiological corroboration. In their study, pianists listening to piano music exhibited involuntary motor activity involving the contralateral primary motor cortex (M1), an effect which was absent in non-pianist musicians. Similar results were obtained in a TMS experiment by D'Ausilio and colleagues (2006). Moreover, it has been proposed that the insular cortex may play a role in the initial phase of the action-perception association (Mutschler et al 2007). The results obtained by Drost were integrated by those of Keller and Koch (2006a; 2006b; 2008) who found that not only perception, but also action-effect anticipation plays a role in planning and executing sequential movements triggering music-like sounds.

The studies described above indicate that music processing does have an effect on motor performance and activates motor-related brain circuits, but the issue of which sound characteristics actually trigger the motor effect has not been adequately studied. The objective of the present research is to investigate, by means of a behavioural experiment, whether the pitch dimension plays a role in the emergence of an auditory-motor interaction effect, an hypothesis which has not been explicitly addressed by previous studies.

It has been proposed that pitch has a complex helix-shaped representation onto which two dimensions are mapped: pitch chroma, mapped onto the spiral plane, and pitch height, mapped onto the linear plane (Shepard 1982; Ueda and Ohgushi, 1987). Pitch chroma refers to a categorical property of sounds (e.g., all the C notes on a C major scale), while pitch height refers to the perceived fundamental frequency of a sound (each individual note of a musical scale has a specific frequency). This study specifically addresses the pitch-height dimension.

Previous research on mental representation of pitch-height dimension in musicians suggests that the “cognitive system maps pitch onto a mental representation of space” (Rusconi et al., 2006, p. 126). In fact, when performing a timber identification task of sounds with different pitches, musicians are faster on low-pitched tones when pressing a left-side key and on high-pitched tones when pressing a right-side key (Rusconi et al. 2006; Lidji et al., 2007). This phenomenon has been called the Spatial Musical Association of Response Code (SMARC) effect. As we will demonstrate later, the SMARC effect could be involved in our experiment, leading to specific predictions.

The three groups (pianists, non-pianist musicians and non-musicians) of participants in our experiment were asked to decide whether a visual stimulus was a circle or a rectangle, and then to communicate their decision by pressing a key to their right or left with their right or left index finger. A task-irrelevant auditory stimulus (a high- or low-pitched chord with a piano timbre) was associated with each visual stimulus. The TEC allows us to advance specific predictions regarding the results. A common code for action and action effects, in consequence of previous piano playing, should lead to an association between right-hand and high-pitched sounds and left-hand and low-pitched sounds, but only in pianists. The structural organization of a piano keyboard imposes a specific mapping between hand actions and sound pitch. High-pitched sounds are located on the right side of the keyboard and low-pitched on the left. This distribution leads to a specific action-effect and, according to the TEC model, to a representation that links action (the movement of the fingers of the right or left hand over a piano keyboard) and action effects (the pitch of the sound produced). As this association is

bidirectional, the sound (action effect) processing should activate the representation of an action that usually leads to its production, so that high-pitched chords should prime right-hand responses, and low-pitched chords left-hand responses. A slightly different prediction can be made, based on the SMARC effect. As said before, when performing a timber identification task of sounds with different pitches, musicians are faster on low-pitched tones when pressing a key to their left and on high-pitched tones when pressing a key to their right (Rusconi et al. 2006; Lidji et al., 2007). If this is true, in our experiment both pianists and non-pianist musicians should show association between right-hand responses and high-pitched sounds and left-hand responses and low-pitched sounds.

We also introduced the distinction between global and local pitch-height effects (see figure 1); this was introduced to test whether a possible relationship between hand response and pitch height is simply dichotomously distributed following a left-right contrast or if there is also a linear distribution along a continuous gradient. A global pitch effect would imply facilitation of the left-hand responses for all the low-pitched chords and of the right-hand responses for all the high-pitched chords included in the task. A local pitch effect, which assumes the presence of a global pitch effect, would imply the presence of a facilitation gradient, thus the higher the pitch the greater the facilitation for the right-hand responses, and the lower the pitch the greater the facilitation for the left-hand responses.

EXPERIMENT

6.1.3 Method

Participants

Three groups of participants took part in the Experiment: fourteen right-handed pianists (6 females and 8 males; average age: 23.4 years); 14 right-handed non-pianist musicians (6 females and 8 males; average age: 26.1 years); 14 right-handed non-musicians (10 females and 4 males; average age: 24 years).

The musicians were post-graduate music students from the Giuseppe Verdi Conservatory, Milan, and the Giuseppe Tartini Conservatory, Trieste. Pianists and non-pianist musicians had, on average, 14.3 and 13.6 years of musical training respectively. The group of non-pianist musicians was composed of 6 guitarists, 4 percussionists, one violinist, one flautist, one clarinet player and one singer. The non-musicians were undergraduate students from the University of Milano-Bicocca, none of whom had ever played a musical instrument. All participants gave written informed consent.

Materials

The experiment was conducted in a dimly lit, soundproofed room. Participants were seated at approximately 60 cm from a 15.4'' computer screen. Presentation of stimuli and registration of Reaction Times (RTs) were controlled using the E-Prime software (version 1.2, Psychological Tools, Inc). The visual stimuli used were a black cross (which served as a central fixation point) and two green geometric shapes (a $5^\circ \times 2.5^\circ$ rectangle and a circle with a diameter of 3.4°), projected on the centre of the screen on white background. The auditory stimuli (see Figure 1) were composed of two major triads, C major and F major, varying along the high-pitch/low-pitch dimension, so that in terms of global pitch there were two high-pitched triads (C4-E4-G4 and F4-A4-C5) and two low-pitched triads (C1-E1-G1 and F1-A1-C2), and in terms of local pitch there were two extreme triads (C1-E1-G1 and F4-A4-C5) and two medium triads (F1-A1-C2 and C4-E4-G4). Each chord was recorded from an acoustic piano and the audio signal was normalized at 75% using Adobe Audition software and played at approximately 65 dB SPL through professional headphones. Participants responded by pressing the F1 or the F12 key on a computer keyboard with either their left or right index finger.

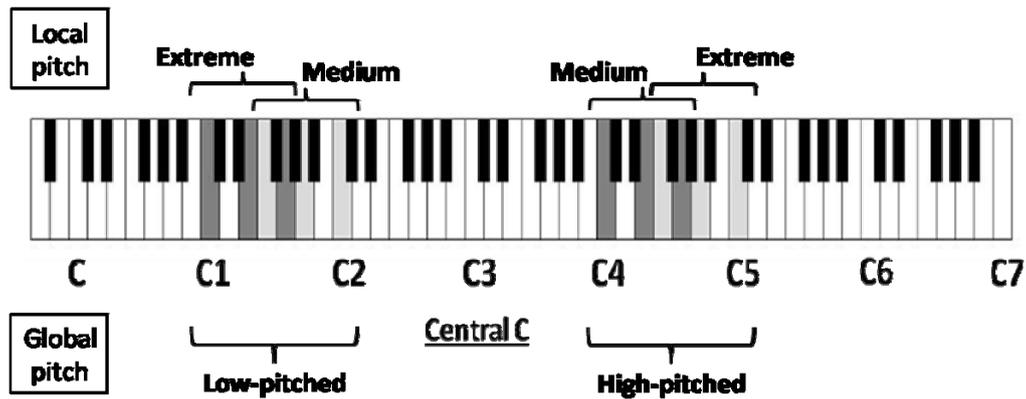


Figure 1: Distribution of the auditory stimuli along the piano keyboard. Dark-grey = C major chords; Light-grey = F major chords; C1, C2, ... = C keys

Procedure and design

The examiner described the task to the participants and explained that the sound stimuli were intended to distract their attention from the visual task, that they were not informative and were to be completely ignored. Each trial started with a 500 ms presentation of the fixation point, followed by the high-pitched or low-pitched chord, the maximum duration of which was 700 ms. The visual stimulus was projected 100 ms after the auditory stimulus and overlapped it until the participant communicated his/her decision regarding the shape (rectangle or circle) of the visual stimulus by pressing either the left or the right key (F1 or F12) on the computer keyboard, within the 1000 ms time limit. The introduction of the 100 ms asynchrony between auditory and visual stimuli is assumed to align the beginning of the visuo-motor task with a complete higher-order spectral sound analysis (Shanin et al. 2003). For 50% of the participants the left-hand response corresponded to the rectangle and the right-hand response to the circle, and conversely for the remaining 50%. This procedure was adopted to prevent interference caused by the remapping of figure-key assignment during the experiment (see Mapelli et al. 2003 and Gevers et al. 2006 for a similar procedure).

The experiment was structured as follows: a training block of 20 trials, followed by 3 blocks (80 trials per block), each consisting of a random combination of the two visual and the four auditory

stimuli, with a short interval between blocks, the duration of which was decided by the participant. The whole experiment lasted about 20 min.

Data analysis

Only RTs on correct responses were analysed. Responses with particularly long latencies (defined as two SDs or more from the mean reaction time for each participant and condition) or faster than 200 ms, were excluded from the analysis.

Statistical analyses were performed on the median RT differences (RTd) between the responses of the right hand and left hand for all conditions in order to investigate the relationship between chord pitch and response side. If left hand responses are faster for low-pitched chords, the right-minus-left difference will be positive; on the contrary, if right hand responses are faster for high-pitched chords, the difference will be negative. In an ANOVA analysis, a relationship between hand response and chord pitch will thus emerge as a main effect rather than a response hand by pitch height interaction (see Lidji et al. 2007 for a similar procedure). In fact, the use of right–minus–left differences instead of simple median RTs merely modifies the level at which the relationship emerges with no effect on the variables included in the statistical model (see note 1 in the Results section).

Data were analyzed with two different procedures: a repeated measure ANOVA and a regression analysis. The ANOVA was performed to study the interactions among variables. The regression analysis (Lorch & Meyers, 1990) evaluates the linear relation between the target variable (chord pitch) and the RTd for each participant, hence avoiding a potential overestimation of the effect due to group averaging. The emergence of a negative slope, whose regression weight is significantly different from 0 in a single sample t-test, would suggest a relationship between low-pitched chords and left-hand responses and high-pitched chords and right-hand responses (Lidji et al. 2007). The

regression analysis was performed using the logarithm of the first note pitch-frequency of each chord as predictor. The logarithmic scale is widely used in music research because it has been demonstrated that the human perceptual system perceives pitch according to this nonlinear scale (Shepard, 1982). We borrowed this analysis procedure from the Spatial Numerical Association of Response Code (SNARC) effect literature, in which it is frequently used to study the association between response side and number magnitude (Fias et al. 1996).

Converging results from the ANOVA and Regression analyses will confirm the validity of the results.

6.1.4 Results

The participants made very few errors (less than 5%), so no data analysis was performed on error rates. The percentage of trials discarded because of errors or RT cut-offs was as follows: 4.9% for pianists, 2.4% for non-pianist musicians and 3.6% for non-musicians. The lack of RTs and error rate correlation computed using the grand average values ($r = 0.119$, n.s.) indicated that there was no speed-accuracy trade-off. Table 1 displays the averaged median RTs for the right-hand and left-hand responses as a function of the chord pitch.

Response side	Low-pitched chords		High-pitched chords	
	C1	F1	C4	F4
Pianists				
Right hand	359 (266-407)	354 (282-403)	343 (248-403)	345 (266-406)
Left hand	348 (266-419)	352 (276-412)	352 (263-406)	365 (312-427)
RTd (right-left)	11	2	-9	-20
Non-pianist musicians				
Right hand	350 (268-394)	357 (301-408)	354 (288-417)	352 (287-414)
Left hand	358 (330-408)	357 (311-403)	355 (324-397)	356 (317-405)
RTd (right-left)	-8	0	-1	-4
Non-musicians				
Right hand	369 (312-417)	363 (291-411)	365 (293-423)	367 (275-427)
Left hand	375 (303-422)	373 (304-421)	370 (303-434)	376 (303-416)
RTd (right-left)	-6	-10	-5	-9

Table 1: Average Median RTs and ranges, in brackets, for the shape decision task in milliseconds and differences between right-hand and left-hand responses (RTd) for each group as a function of the chord height (C = C major chord; F = F major chord, see figure 1).

RTd were analyzed by means of a three-way ANOVA. *Global pitch* (high or low-pitched chords) and *Local pitch* (relative pitch within categories) were the within-subject variables; participant groups (pianists, non-pianists musicians and non-musicians) were the between-subject variable.

The analysis identified a main effect of Global pitch [$F(1, 39) = 5.91$, $MSE = 301.05$, $p = .02$] indicating that participants had shorter RTs on the left hand than on the right hand to low-pitched chords, and shorter RTs on the right hand than on the left hand to high-pitched chords. The significant interaction between Global pitch and Group indicated that the Global pitch effect was

different in the three groups of participants [$F(2, 39) = 7.76$, $MSE = 301.05$, $p = 0.001$]. Post-hoc comparisons, computed using the Bonferroni t-test, indicate that the Global pitch effect appears in pianists only (Pianists vs Non-pianist musicians and Pianists vs Non-musicians, $p = 0.0001$; see Figure 2). In fact, only pianists obtained positive RTd for low-pitched chords and negative RTd for high-pitched chords (see Table 1). No other effects emerged from the ANOVA⁶.

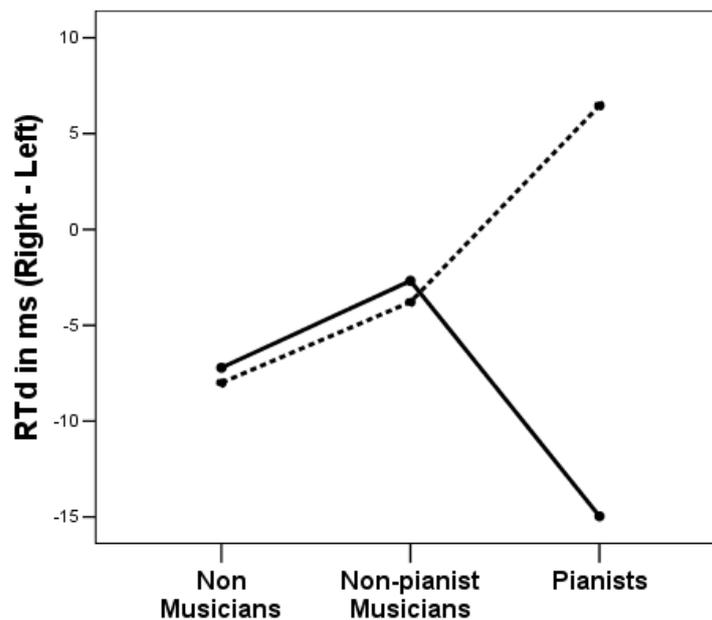


Figure 2: Interaction between Global pitch and Group. RTd between right-hand and left-hand responses as a function of Group and pitch-height. Solid line = high-pitched chords; dotted line = low-pitched chords.

The regression analysis appears to be more informative than the ANOVA. Adopting the method proposed by Lorch and Meyers (1990), a linear regression was computed for each participant, in which RTd were predicted on the basis of chord pitch and the regression slope was estimated. Negative regression slopes are an expression of strong association between left-hand responses and low-pitched chords, and between right-hand responses and high-pitched chords. The

⁶ Comparable results were obtained using mean RTs instead of difference scores (RTd) and applying a four-way mixed ANOVA - with response hand (right vs left), global pitch (high-pitched vs low-pitched), local pitch (extreme vs medium) and group (pianists vs non-pianist musicians vs non-musicians) as factors - instead of a three-way mixed ANOVA.

resulting regression slopes were entered in a single sampling t-test computed for each group of participants. Consistently with the results of the ANOVA, the regression analyses computed on the pianists indicated a significant negative slope [$t(13) = -6.38, p = 0.001$]. Conversely, neither the slopes of the non-pianist musicians nor of the non-musicians differed significantly from zero [$t(13) = 0.998, n.s.$, and $t(13) = 0.458, n.s.$, respectively] (Figure 3). These results were further investigated by entering the slopes of three groups in a one-way ANOVA to directly compare the mean slopes which emerged as being significantly different [$F(2, 39) = 8.7, p = 0.001$]. Post-hoc comparisons revealed that the mean slope for pianists (-0.620 ± 0.471) was significantly different from those of both non-pianist musicians ($0.042 \pm 0.473, p = 0.002$) and non-musicians ($0.005 \pm 0.471, p = 0.003$), whereas no differences emerged between mean slopes for non-pianist musicians and non-musicians ($p = 1$).

Although the regression analysis did not distinguish between Global pitch and Local pitch, the pianist results point to a tendency towards a local pitch effect that was not detected by the ANOVA. As can be seen from the regression analysis plot (Figure 3), the pianists' left-hand responses are slightly faster for extremely low-pitched chords than for medium low-pitched chords. The same effect also appeared for right-hand responses.

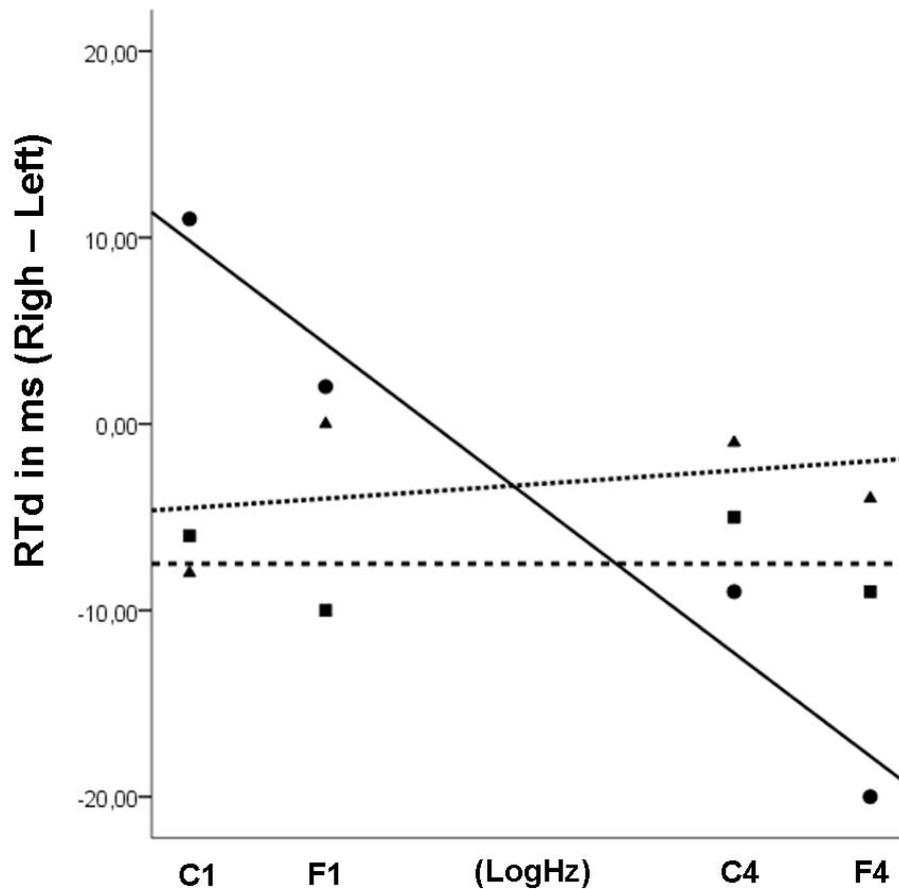


Figure 3: Observed data and regression lines of the RTd between right-hand and left-hand responses for pianists, non-pianist musicians and non-musicians as a function of pitch of the first note of the chord. Circles and solid line = pianists; triangles and dotted line = non-pianist musicians; squares and dashed line = non-musicians.

6.1.5 Discussion

The aim of the present study is to assess whether the implicit processing of musical sound that varies along the low-pitched/high-pitched dimension primes motor responses. We tested three groups of participants (pianists, non-pianist musicians and non-musicians) with a shape decision task in which task-irrelevant auditory stimuli (high-pitched or low-pitched chords) were presented concurrently with visual stimuli. The ANOVA results suggest that only pianists have faster left-hand responses for the implicit processing of low-pitched chords, and faster right-hand responses for the implicit processing of high-pitched chords. This effect appeared in terms of global but not local pitch. Nevertheless, the regression analysis suggests a tendency to a local pitch effect. The phenomenon is

not related to general musical competence, since non-pianist musicians did not show this effect. Results suggest the involvement of a motor representation. Pianists and non-pianist musicians share a common theoretical knowledge of music (e.g. reading skills, harmony rules), but procedural knowledge on how to execute pitch level is specific for their own particular instruments. Furthermore, the absence of the effect in the non-musician group rules out the hypothesis that a non-learned process may be involved in the genesis of the observed priming effect.

The TEC framework (Hommel et al., 2001) predicts that action effect processing evokes the corresponding action representation, set up on a common representational domain for action codes and action-effect codes. The acquisition of these representations would be related to repeated and contingent action-effect experiences. Our results concord with these assumptions; among our participants, only pianists had previous repeated and contingent action-effect experience related to sound production on a piano keyboard. As already mentioned, the structural organization of a piano keyboard is such that pianists learn that right-hand movements produce high-pitched sounds and left-hand movements low-pitched sounds. It is therefore reasonable to assume that the long training required to acquire skill on the piano would produce an integration between right-hand actions and high-pitched sounds, and left-hand actions and low-pitched sounds at the level of the common representational domain, so that the processing of high-pitched sounds (action effect) prime right-hand actions, and the same happens for low-pitched sounds and left-hand actions.

The tendency towards a local pitch effect emerged from the regression analysis (the lack of significance in the ANOVA may be due to low statistical power) suggesting a linear gradient in the effect. Pitch is represented at cognitive level in two dimensions, height and chroma. In the present experiment we specifically addressed the former dimension, which is linearly represented at mental level (Shepard 1982; Ueda and Ohgushi, 1987). We can therefore speculate that our results capture the pitch-height dimension (Cohen Kadosh et al 2008), however further investigation is required to verify this hypothesis.

When performing a musical instrument identification task of sounds with different pitches, musicians have been found to be faster on low-pitched tones with their left hand and on high-pitched tones with their right hand; this phenomenon is known as the Spatial Musical Association of Response codes (SMARC) effect (Rusconi et al. 2006; Lidji et al., 2007). The explanation offered for this effect is that “our cognitive system maps pitch onto a mental representation of space” (Rusconi et al., 2006, p 126). The pattern of results emerging from the present study rules out a possible explanation of our data based on the SMARC effect, since only pianists were faster on low-pitched chords with their left hand and on high-pitched chords with their right hand, whereas there no effect appeared in non-pianist musicians. As no distinction was made between the performance of pianists and non-pianist musicians in the two studies on the SMARC effect, our results may challenge an exclusively spatial interpretation of the phenomenon for the left-right dimension in the musician group. Compared to classical SMARC tasks (timbre discrimination or pitch-height confrontation), the procedure we adopted does not require voluntary processing of the auditory stimuli since the task is visual; moreover, we used chords instead of single notes. These differences may explain the inconsistent results. Further experiments are needed to provide new evidence of a possible auditory-motor interaction in the SMARC effect. Moreover, our results do not match those obtained with non-musicians in a pitch-height judgment task (Sonnadara et al. 2009, Experiment 1), which showed low tones facilitating responses with the left hand, and high tones facilitating responses with the right hand. This association effect along the horizontal dimension is in line with results obtained in experiments where participants are required to judge pitch height directly (Rusconi et al. 2006, Experiment 1). However, when pitch height is not explicitly involved in the task, the horizontal association effect disappears for non-musicians but not for musicians (see Rusconi et al. 2006, Experiment 2 and 3). Rusconi and colleagues suggest that for non-musicians this association depends on a linguistic clue, and the fact that it is not present in tasks where explicit pitch-height judgment is not involved seems to support this interpretation. In the same study Sonnadara and colleagues (2009) found a bias in localizing a high- or low-pitched sound with a pointer in the vertical (but not in the

horizontal) plane (Experiment 2), while a bias for both planes emerged when the auditory stimuli were delivered through headphones instead of loudspeakers (Experiment 3). The authors do not account for the discrepancies in the results of Experiments 2 and 3. In our opinion the comment offered by Rusconi et al. (2006, p. 116) could be extended to Sonnadara's results, namely that when pitch-height is directly involved in the task "one cannot say whether pitch height is spontaneously or mandatorily mapped onto space, and whether the assignment of high-frequency pitches to high (or right) locations and low-frequency pitches to low (or left) locations generalizes to a context where participants' main concern is not to locate or to represent pitches in space". Our study respects this constraint, since the auditory stimuli were the explicit target of the task, which could account for the inconsistency between our results and those of Sonnadara.

To conclude, the present results support the hypothesis that the pitch-height dimension has a role in the emergence of the auditory-motor interaction, but further studies are needed to provide a better understanding of the different components involved in this effect.

6.2 Dinamica temporale dell'effetto di interazione uditivo-motoria mediato dall'altezza del suono (Esperimento 2)

6.2.1 Introduzione

Nel precedente studio (Esperimento 1, Trimarchi e Luzzatti, 2010) è stato dimostrato che nei pianisti l'elaborazione implicita dell'altezza di un suono musicale genera un fenomeno interpretabile come interazione uditivo-motoria. Tale evidenza suggerisce che la rappresentazione dell'altezza dei suoni nei musicisti codificati non solo aspetti di natura uditiva quali la frequenza del suono, ma anche aspetti di natura motoria associati alla produzione di suoni con quelle caratteristiche. Il risultato è stato interpretato facendo riferimento alla Theory of Event Coding (TEC; Hommel e coll., 2001), secondo cui aspetti percettivi e aspetti motori di un'azione condividono un formato rappresentazionale comune. Seguendo tale principio, appare evidente che per un pianista l'altezza di un suono musicale è indissolubilmente associata al piano motorio che solitamente usa per produrre suoni di una certa altezza.

Il presente esperimento ha un duplice scopo: in primo luogo quello di replicare i risultati ottenuti nel precedente studio con il gruppo di pianisti, in secondo luogo quello di verificare se l'intervallo temporale che separa lo stimolo uditivo da ignorare dallo stimolo visivo che elicitava la risposta motoria ha un ruolo specifico nel fare emergere o nel modificare l'effetto di interazione uditivo-motoria. In merito a questo secondo punto, si vuole chiarire se l'attivazione della rappresentazione da parte dello stimolo uditivo va incontro a un processo di decadimento, con conseguente diminuzione o scomparsa dell'effetto di interazione, oppure se tale attivazione rimane costante nell'arco di una finestra temporale di 400 ms. A questo fine, il presente esperimento usa un paradigma sperimentale identico a quello dell'esperimento precedente (Esperimento 1), con l'unica differenza di introdurre diversi Stimulus Onset Asynchrony (SoA) tra stimolo uditivo e stimolo visivo. La gran parte degli studi comportamentali precedenti hanno indagato l'interazione uditivo-motoria nei pianisti sfruttando un paradigma sperimentale che prevedeva la presentazione contemporanea degli stimoli uditivo e

visivo (Drost e coll., 2005a; 2005b; 2007). Mancano dunque evidenze empiriche riguardo la dinamica temporale del fenomeno di interazione uditivo-motoria.

Studi precedenti hanno dimostrato che in compiti di compatibilità stimolo-risposta (ad es. quelli che elicitano l'effetto Simon) la codifica di informazioni non rilevanti per il compito ma fondamentali per l'emergere dell'effetto di compatibilità subisce un veloce decadimento quantificato in 200 ms per l'effetto Simon (Hommel 1994, Kornblum e coll., 1999). Come è noto, nell'effetto Simon l'informazione spaziale associata allo stimolo, irrilevante per il compito, genera una rappresentazione che elicitava l'effetto. Rilevare se la dinamica temporale dell'effetto emerso nel precedente studio abbia o meno caratteristiche simili a quelle emerse per altri effetti di compatibilità stimolo-risposta in cui l'informazione spaziale risulta cruciale permetterà di fare inferenze riguardo i processi di base che supportano il suo manifestarsi.

6.2.2 Materiali e Metodi

Partecipanti

In questo studio hanno partecipato 14 pianisti (6 femmine e 8 maschi) reclutati presso il Conservatorio di Musica G. Verdi di Milano. Tutti i partecipanti erano destrimani sulla base della somministrazione della Scala di dominanza manuale di Edimburgo (Oldfield, 1971). L'età media dei partecipanti era di 25 anni ($\pm 8,39$). Il numero medio di anni di pratica strumentale era di 17,71 ($\pm 8,85$). Il numero medio di ore a settimana passate a studiare o suonare il pianoforte era di 22,64 ($\pm 8,71$).

Materiali

L'esperimento è stato condotto in una stanza scarsamente illuminata e isolata acusticamente. I partecipanti sedevano a circa 60 cm dallo schermo di un pc della grandezza di 15.4". La presentazione degli stimoli e la registrazione dei Tempi di Reazione (TR) erano controllate per mezzo del software E-prime (version 1.2, Psychological Tools, Inc).

Gli stimoli visivi utilizzati, identici all'esperimento presentato nel precedente capitolo, erano un simbolo di addizione di colore nero (che serviva come punto di fissazione centrale) e due figure geometriche di colore verde (un rettangolo di $5^\circ \times 2,5^\circ$ di angolo visivo e un cerchio con un diametro di $3,4^\circ$ di angolo visivo) proiettate alternativamente al centro dello schermo su sfondo bianco. Gli stimoli uditivi (vedi Figura 6.1), anch'essi identici a quelli dello studio precedente, erano composti da quattro accordi maggiori (due di DO maggiore e due di FA maggiore) che variavano lungo la dimensione dell'altezza del suono. Erano presenti due accordi acuti (DO4-MI4-SOL4 e FA4-LA4-DO5) e due accordi gravi (DO1-MI1-SOL1 e FA1-LA1-DO2) che costituivano una condizione generale di altezza del suono. I due accordi acuti e i due accordi gravi variavano, a loro volta, in termini di altezza poiché un accordo era più acuto, o più grave, e l'altro meno acuto, o meno grave. Ciò generava un diverso livello di altezza che abbiamo definito come Estremo o Medio (vedi Figura 6.1). Ogni accordo è stato registrato da un pianoforte acustico; il segnale audio è stato successivamente normalizzato al 75% mediante il software Adobe Audition e fatto ascoltare a un volume di circa 65 dB SPL attraverso cuffie professionali. I partecipanti rispondevano premendo i tasti F1 o F12 della tastiera del pc rispettivamente con l'indice della mano sinistra o destra.

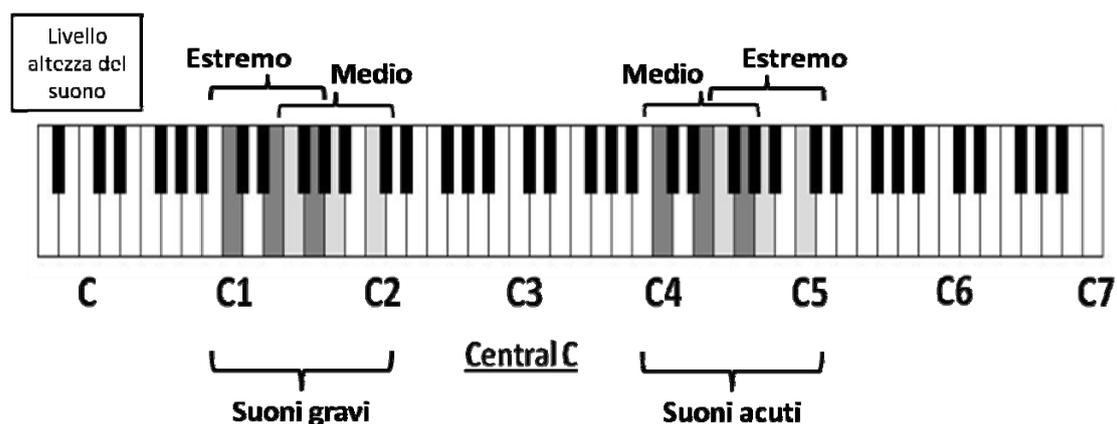


Figura 6.1. Distribuzione degli stimoli uditivi lungo la tastiera del pianoforte. I tasti di colore grigio scuro indicano gli accordi di DO maggiore, i tasti di colore grigio chiaro indicano gli accordi di FA maggiore. La lettera C indica la nota DO in notazione anglosassone, i numeri indicano, in progressione, l'altezza del suono dal grave all'acuto.

Procedura

L'esaminatore descriveva il compito ai partecipanti spiegando loro che gli stimoli uditivi avevano il solo scopo di distrarre dal compito visivo principale, che non erano informativi e che andavano totalmente ignorati. Ogni trial iniziava con la presentazione di un punto di fissazione centrale per 500 ms, a questo seguiva la presentazione degli stimoli uditivi e visivi. Gli stimoli uditivi erano presentati 400 ms, 300 ms 200 ms prima o contestualmente allo stimolo visivo generando così quattro possibili condizioni di SoA. La durata massima degli stimoli uditivi era di 700 ms. Lo stimolo visivo aveva una durata massima di 1000 ms, che costituiva la finestra temporale utile per fornire la risposta, e spariva non appena il partecipante rispondeva. Il compito dei partecipanti era di rispondere premendo il tasto sinistro o destro (F1 o F12) in funzione della forma della stimolo visivo. L'associazione tra mano di risposta e forma della figura è stata controbilanciata tra i soggetti

La sessione sperimentale aveva la seguente struttura: un blocco di 20 trial di prova era seguito da 4 blocchi di 128 trial. Ogni blocco era composto dalla combinazione randomizzata dei due stimoli visivi e dei quattro stimoli uditivi secondo uno dei quattro possibili SoA. Alla fine di ogni singolo blocco il partecipante era invitato a riposarsi per qualche istante. L'intero esperimento durava circa 30 minuti.

Analisi dei dati

Sono stati analizzati solo i tempi di reazione (TR) delle risposte corrette. I trial con TR particolarmente lunghi (2 DS o più rispetto alla media dei TR per ogni soggetto e ogni condizione) o particolarmente brevi (inferiori a 200 ms) sono stati esclusi dalle analisi.

Vista la sostanziale sovrapponibilità dei risultati ottenuti nell'esperimento 1 usando la mediana o la media dei TR (vedi nota 1 nella sezione "Risultati" dell'Esperimento 1) abbiamo deciso di usare quest'ultima come misura di tendenza centrale.

Un'ulteriore modifica nell'analisi dei dati rispetto all'esperimento 1 riguarda i fattori usati nell'analisi. Nell'esperimento 1 abbiamo dimostrato che le risposte della mano destra sono più veloci durante l'elaborazione di suoni acuti rispetto ai gravi e che le risposte della mano sinistra sono più veloci nella situazione opposta. Questo risultato rispecchia il mapping motorio che il pianista apprende suonando il pianoforte, infatti i suoni acuti vengono prevalentemente eseguiti con la mano destra e i suoni gravi con la sinistra. Ciò porta a ritenere congruente, rispetto al mapping mano-tastiera, l'associazione mano-destra/suoni-acuti e mano-sinistra/suoni-gravi, e incongruente l'associazione opposta e ad aspettarsi risposte significativamente più veloci per la condizione congruente rispetto alla incongruente. Nel presente esperimento, dunque, al fine di rendere i risultati più facilmente interpretabili, abbiamo deciso di applicare l'approccio appena descritto all'analisi dei TR dividendo questi ultimi in funzione della congruenza (congruenti vs incongruenti).

Un ulteriore fattore considerato riguarda il livello di altezza del suono associato allo stimolo visivo. Ogni stimolo visivo è associato a due possibili suoni acuti o due possibili suoni gravi. Per ogni altezza, uno dei due suoni è più acuto o più grave dell'altro, generando così due livelli di altezza uno estremo (più acuto o più grave) e uno medio (meno acuto o meno grave). Questa manipolazione è stata introdotta per studiare l'eventuale presenza di un gradiente nell'effetto di congruenza,

Riassumendo, il disegno dell'esperimento era così strutturato: modello ANOVA fattoriale 2x2x4 che prevedeva i seguenti fattori: *Congruenza* (congruente vs incongruente); *Livello altezza del suono* (estremo vs medio); *SoA* (0, 200, 300 o 400 ms).

6.2.3 Risultati

I partecipanti hanno commesso un basso numero di errori (3,2% sul totale dei trial), non è stata dunque eseguita una specifica analisi di questi ultimi. L'assenza di correlazione tra i TR e la percentuale di errori commessi esclude la presenza di speed-accuracy trade-off ($r = -0,213$; ns). La

tabella 6.1 riporta i TR medi in funzione della condizione di congruenza, del livello del suono e dei diversi SoA.

I risultati dell'ANOVA mostrano la presenza di un effetto principale per il fattore *Congruenza* [$F(1, 27) = 17,387, p < 0,001$ (Correzione Lower-bound)]. Globalmente i TR per la condizione congruente sono inferiori rispetto a quelli per la condizione incongruente (365 ms vs 372 ms rispettivamente). Ciò indica una chiara associazione tra risposte della mano destra e suoni acuti e risposte della mano sinistra e suoni gravi. Emerge inoltre un effetto principale per il fattore *SoA* [$F(1, 27) = 161,072, p < 0,001$ (Correzione Lower-bound)] indice di una differenza nei TR per i diversi livelli di SoA. Come illustrato dalla figura 6.2, i TR tendono progressivamente a diminuire passando da un SoA di 0 ms a uno di 400 ms.

Congruenza			
Livello del suono	Congruente	Incongruente	Incongruente - Congruente
SoA = 0			
Estremo	408 ($\pm 35,41$)	415 ($\pm 33,18$)	7
Medio	411 ($\pm 34,59$)	416 ($\pm 30,58$)	5
SoA = 200			
Estremo	356 ($\pm 31,70$)	366 ($\pm 26,45$)	10
Medio	365 ($\pm 41,06$)	368 ($\pm 25,35$)	3
SoA = 300			
Estremo	347 ($\pm 35,85$)	360 ($\pm 32,00$)	13
Medio	346 ($\pm 34,07$)	351 ($\pm 28,08$)	5
SoA = 400			
Estremo	343 ($\pm 37,92$)	357 ($\pm 38,86$)	14
Medio	348 ($\pm 31,14$)	347 ($\pm 36,55$)	-1

Tabella 6.1. TR medi (espressi in ms) e deviazioni standard in funzione della condizione di congruenza, del livello di altezza del suono e dei diversi SoA.

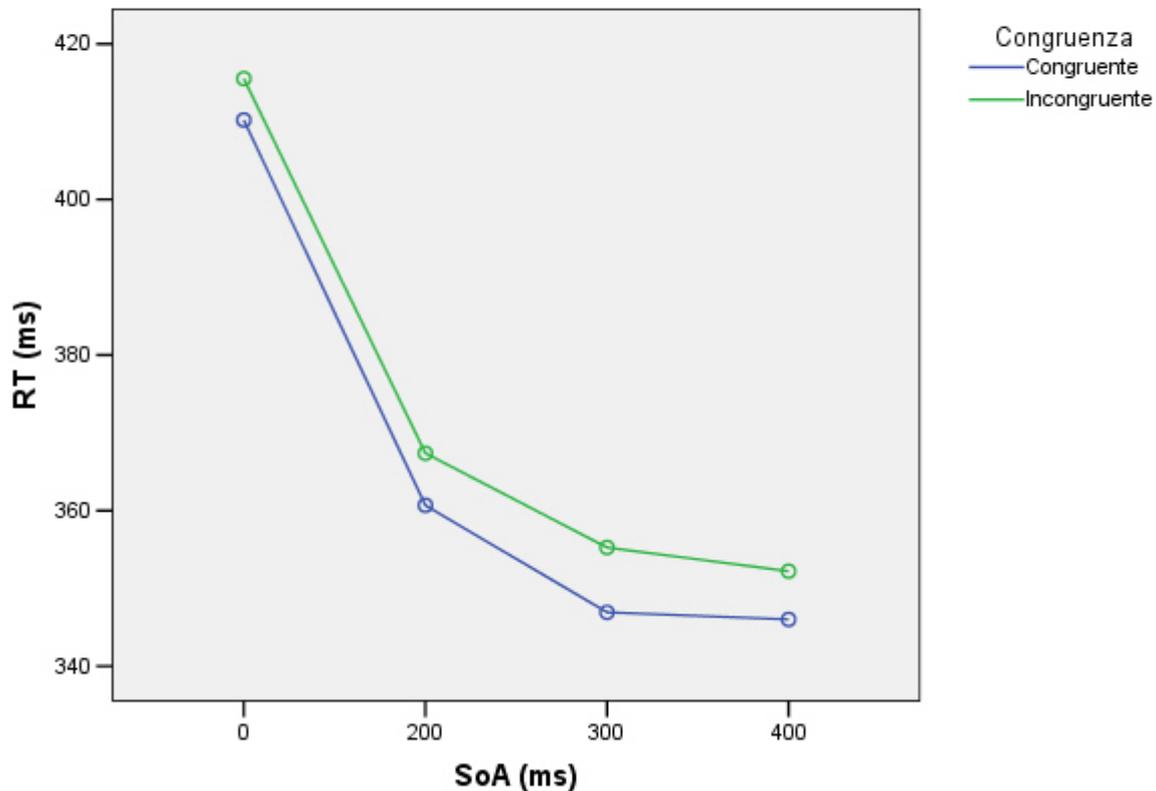


Figura 6.2. Grafico dell'effetto di congruenza espresso per i diversi SoA.

Un ulteriore risultato emerso è una tendenza alla significatività nell'interazione tra *Congruenza* e *Livello di altezza del suono* [$F(1, 27) = 3,575, p = 0,69$ (Correzione Lower-bound)]. Come chiaramente rappresentato in figura 6.3 ciò indica che l'effetto di congruenza tende ad essere modulato dal livello di altezza del suono. In particolare, per il livello estremo i TR alla condizione congruente sono di 364 ms e alla condizione incongruente sono di 375 ms; per il livello medio i TR alla condizione congruente sono di 368 ms e alla condizione incongruente di 371 ms. In altre parole, l'effetto di associazione tra suoni acuti e mano destra e suoni gravi e mano sinistra tende ad essere maggiore per i suoni estremi e minore per i suoni medi. Nessun altro effetto è emerso dall'ANOVA.

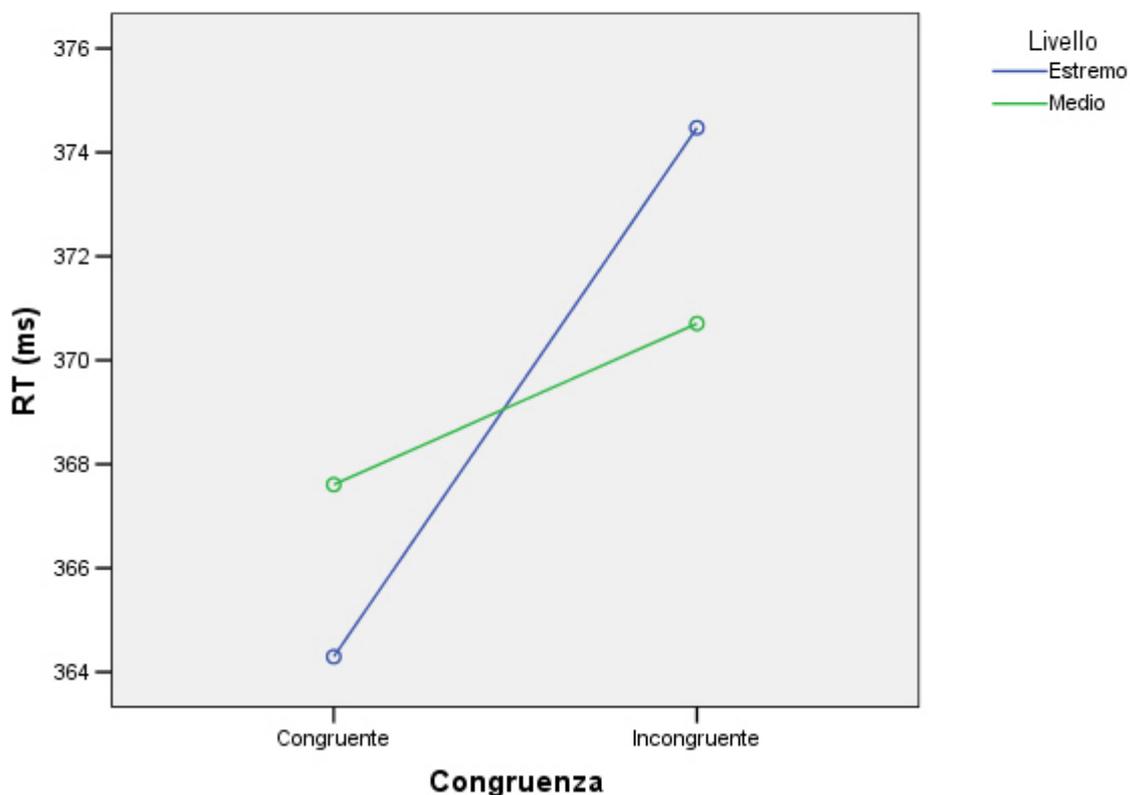


Figura 6.3. Grafico dell'interazione tra i fattori Congruenza e Livello del suono.

6.2.4 Discussione

Nel precedente studio (Esperimento 1) abbiamo dimostrato che nei pianisti, ma non nei musicisti non pianisti o nei non musicisti, l'elaborazione implicita di accordi acuti era associata a risposte più veloci della mano destra, mentre l'elaborazione di accordi gravi a risposte più veloci della mano sinistra. Questa associazione, che ricalca la relazione tra azioni motorie delle due mani sulla tastiera del pianoforte e altezza dei suoni prodotti, suggerisce che nei pianisti le rappresentazioni relative all'altezza di un suono prodotto dal loro strumento comprendano non solo aspetti di natura uditiva, la qualità di essere acuto o grave, ma anche elementi di natura motoria legati all'azione solitamente

eseguita per produrre al pianoforte suoni con quelle caratteristiche. Questo risultato suggerisce la presenza di fenomeni di interazione uditivo-motoria mediati dall'altezza del suono.

L'obiettivo del presente esperimento era di replicare con un gruppo di pianisti diverso il risultato ottenuto nel precedente studio e di indagare la dinamica temporale con cui l'effetto di associazione tra mano e altezza del suono si manifesta. A questo scopo abbiamo valutato i TR dei partecipanti a un semplice compito di discriminazione di forma cui era associato uno stimolo uditivo irrilevante per il compito e posto a quattro differenti SoA rispetto all'apparire dello stimolo visivo che elicitava la risposta motoria. Ad esclusione dell'uso di differenti SoA per lo stimolo uditivo, il paradigma sperimentale era identico a quello usato nello studio precedente. I dati sono stati analizzati in termini di congruenza/incongruenza tra risposta motoria destra o sinistra e altezza del suono acuto o grave in riferimento a quanto emerso nello studio precedente. Si avevano dunque due condizioni: congruente, quando i partecipanti sentivano un suono acuto o grave e rispondevano rispettivamente con la mano destra o sinistra; incongruente, quando i partecipanti sentivano un suono acuto o grave e rispondevano rispettivamente con la mano sinistra o la destra. TR più brevi per la condizione congruente rispetto alla incongruente segnalano una associazione tra suoni acuti e risposte della mano destra e suoni gravi e risposte della mano sinistra.

I risultati mostrano che globalmente le risposte alla condizione congruente sono significativamente più veloci rispetto alla condizione incongruente. Questo risultato conferma quanto già ottenuto nello studio precedente. Le risposte della mano destra ai suoni acuti e della sinistra ai suoni gravi sono più veloci rispetto alla condizione opposta (mano destra/suoni gravi, mano sinistra/suoni acuti). L'effetto sembra inoltre essere modulato dalla maggiore o minore acutezza o gravità dei suoni utilizzati. Infatti, l'associazione emersa tendeva ad essere maggiore per i suoni di livello estremo e minore per i suoni di livello medio, anche se questo risultato approssima solo la significatività statistica. È emerso inoltre un effetto significativo della SoA, in particolare, quando lo stimolo uditivo e lo stimolo visivo venivano presentati contemporaneamente i TR erano più lenti rispetto alle condizioni in cui lo

stimolo uditivo precedeva quello visivo di 200, 300 o 400 ms. L'interazione tra il fattore *Congruenza* e il fattore *SoA* non era significativa, ciò indica che l'effetto di congruenza era sostanzialmente stabile ai diversi *SoA*.

L'assenza di modulazione dell'effetto di congruenza da parte della *SoA* suggerisce una natura diversa del presente effetto rispetto ad altri fenomeni di compatibilità Stimolo-Risposta quali, ad esempio, l'effetto Simon. Come è noto, l'effetto Simon è legato all'attivazione di una rappresentazione spaziale irrilevante per il compito ma che interagisce con la selezione della risposta motoria utile al compito sperimentale (Lu e Proctor, 1995). Questa rappresentazione spaziale presenta una dinamica temporale caratteristica: una volta attivata dallo stimolo sperimentale tende a decadere entro una finestra temporale di 200 ms. La conseguenza è che l'effetto Simon sparisce se, attraverso una manipolazione sperimentale, la rappresentazione spaziale viene attivata prima di 200 ms dalla risposta motoria (Hommel, 1994; Kornblum e coll., 1999).

La diversa dinamica temporale dell'effetto emerso nel presente studio rispetto a quella dell'effetto Simon, suggerisce che la creazione di una rappresentazione spaziale mediata dall'ascolto di suoni acuti o gravi non sia l'elemento fondamentale, o comunque non sia l'unico processo, che promuove l'emergere della relazione tra suoni acuti e mano destra e suoni gravi e mano sinistra nel nostro gruppo sperimentale. Ciò non significa che una rappresentazione spaziale legata agli stimoli uditivi usati nel presente esperimento non sia coinvolta nel processo che genera l'effetto emerso, ma che una spiegazione esclusivamente spaziale non può essere avanzata.

Negli esperimenti successivi abbiamo cercato di chiarire l'eventuale presenza di rappresentazioni di natura spaziale nell'effetto di associazione emerso.

6.3 Interazione uditivo-motoria e rappresentazioni spaziali nell'elaborazione dell'altezza del suono da parte di pianisti (Esperimento 3)

6.3.1 Introduzione

Nell'esperimento 2 abbiamo replicato i risultati ottenuti con i pianisti nell'esperimento 1. Come dimostrato dalla presenza di un effetto congruenza, l'ascolto di accordi acuti facilitava le risposte della mano destra mentre l'ascolto di suoni gravi quelle della mano sinistra. Questo effetto tendeva ad essere modulato dal livello di altezza del suono, ossia era maggiore se i suoni erano molto acuti o molto gravi e minore nel caso in cui i suoni erano mediamente acuti o gravi.

Un ulteriore risultato ottenuto riguarda l'andamento temporale dell'effetto di associazione tra mano di risposta e altezza del suono dell'accordo. È stata rilevata un'associazione costante nel tempo entro una finestra temporale di 400 ms. Quest'ultimo risultato suggerisce che il processo alla base di questo effetto sia sostanzialmente diverso da più noti effetti di compatibilità stimolo-risposta come l'effetto Simon. Come è noto, quest'ultimo è prodotto da un meccanismo legato alla selezione della risposta. In particolare la posizione dello stimolo, irrilevante per il compito, attiva automaticamente una rappresentazione spaziale che, se uguale a quella attivata dalla risposta selezionata in funzione del compito sperimentale, genera una facilitazione che si esprime in tempi di reazione (TR) più brevi rispetto alla condizione di non corrispondenza (Kornblum e coll., 1990). L'effetto Simon presenta una dinamica temporale caratteristica: il codice spaziale attivato dalla posizione dello stimolo tende a decadere entro una finestra temporale di 200 ms con la conseguente scomparsa dell'effetto di associazione tra stimolo e risposta (Hommel, 1994). La diversa dinamica temporale emersa per l'effetto di associazione rilevato nell'esperimento 2 suggerisce che questo non avvenga, come l'effetto Simon, a livello di selezione della risposta.

Un aspetto interessante riguardo la dinamica temporale rilevata nell'esperimento 2 è la sua somiglianza con quella che caratterizza altri effetti di compatibilità legati a meccanismi di accesso

automatico a rappresentazioni della grandezza dei numeri (SNARC, Dehaene e coll., 1993) o dell'uso di oggetti (Affordance, Tucker e Ellis, 1998). Precedenti studi hanno ipotizzato che l'altezza del suono, nei musicisti, sia rappresentata cognitivamente in termini spaziali secondo una distribuzione che prevede la collocazione dei suoni gravi nello spazio sinistro e dei suoni acuti nello spazio destro (SMARC-effect, Rusconi e coll., 2006; Lidji e coll., 2007). La dinamica temporale dell'effetto SMARC non è caratterizzata da un rapido esaurimento come per l'effetto Simon (Nishimura e Yokosawa, 2009) e ciò sembra essere in linea con i risultati emersi nell'esperimento 2. Tuttavia i risultati dell'esperimento 1 sembrerebbero suggerire che una distribuzione sinistra/destra della rappresentazione dell'altezza del suono sia presente solo nei pianisti, dal momento che l'effetto di associazione tra risposte della mano destra e suoni acuti, e risposte della mano sinistra e suoni gravi era assente nei musicisti non-pianisti e nei non musicisti. Abbiamo dunque ipotizzato che, almeno nei pianisti, potesse essere coinvolta una rappresentazione motoria legata all'associazione tra gesti eseguiti sulla tastiera del pianoforte e altezza dei suoni associati. Questo non significa che l'effetto non preveda anche il ruolo di una componente spaziale astratta. In questo studio abbiamo cercato di valutare se l'effetto emerso negli esperimenti 1 e 2 sia totalmente mediato dall'attivazione di una rappresentazione motoria legata all'apprendimento dell'associazione tra gesto sulla tastiera ed effetto percettivo oppure se è implicata anche una rappresentazione di natura spaziale.

È stato dimostrato che l'emergere di un effetto di compatibilità stimolo-risposta è mediato dal sistema di riferimento attivato durante l'esecuzione del compito (Cho e Proctor, 2003). Nel nostro caso i sistemi di riferimento in gioco sarebbero due, uno di natura spaziale e uno di natura motoria. È stato inoltre dimostrato che diversi frame of reference possono essere attivati nello stesso tempo e interagire tra loro (Carlson-Radvansky e Irwin, 1993). Se la rappresentazione dell'altezza dei suoni nei pianisti è esclusivamente di natura motoria, come sembra suggerire l'esperimento 1, allora in una condizione sperimentale in cui i partecipanti eseguissero lo stesso compito degli esperimenti 1 e 2 ma rispondessero con le mani incrociate, ossia premendo il tasto di sinistra con la mano destra e quello di destra con la sinistra, ci si aspetterebbe che l'effetto di associazione rimanga "legato" alla mano di

risposta. Dunque la mano sinistra, pur premendo il tasto posto a destra del piano medio sagittale del soggetto, dovrebbe avere una facilitazione per i suoni gravi e la destra per i suoni acuti. Diversamente, se la rappresentazione è totalmente spaziale astratta, l'effetto di associazione dovrebbe essere "legato" alla posizione del tasto di risposta e dunque, considerando come congruenti le condizioni mano destra/suono acuto e mano sinistra/suono grave e incongruenti le associazioni opposte, dovrebbe emergere un vantaggio per la condizione incongruente rispetto alla congruente. Se invece la rappresentazione comprendesse tanto aspetti di natura motoria legati all'effettore con cui si risponde quanto aspetti di natura spaziale astratta allora ci si aspetterebbe che rispondendo con le mani incrociate l'effetto di associazione sparisca perché si creerebbe un conflitto tra i due sistemi di riferimento che annullerebbe l'effetto di associazione (Carlson-Radvansky e Irwin, 1993). Il compito svolto con le mani non-incrociate non permette di discriminare tra l'ipotesi totalmente spaziale e l'ipotesi totalmente motoria perché in quella condizione le due forme di rappresentazione non sono in conflitto tra loro.

6.3.2 Materiali e Metodi

Partecipanti

In questo studio hanno partecipato 13 pianisti (8 femmine e 5 maschi) reclutati presso il Conservatorio di musica G. Tartini di Trieste. Nessuno di loro ha preso parte ai precedenti esperimenti. Tutti i partecipanti erano destrimani sulla base della somministrazione della Scala di dominanza manuale di Edimburgo (Oldfield, 1971). L'età media dei partecipanti era di 21,3 anni ($\pm 2,7$). Il numero medio di anni di pratica strumentale era di 13, 8 ($\pm 3,1$). Il numero medio di ore a settimana passate a studiare o suonare il pianoforte era di 19,4 ($\pm 10,4$).

Materiali

L'esperimento è stato condotto in una stanza scarsamente illuminata e isolata acusticamente. I partecipanti sedevano a circa 60 cm dallo schermo di un pc della grandezza di 15,4". La

presentazione degli stimoli e la registrazione dei Tempi di Reazione (TR) erano controllate per mezzo del software E-prime (version 1.2, Psychological Tools, Inc).

Come per l'esperimento 1, gli stimoli visivi utilizzati erano un simbolo di addizione di colore nero (punto di fissazione centrale) e due figure geometriche di colore verde (un rettangolo di $5^\circ \times 2,5^\circ$ di angolo visivo e un cerchio con un diametro di $3,4^\circ$ di angolo visivo) proiettate al centro dello schermo su sfondo bianco. Gli stimoli uditivi (vedi Figura 6.4) erano composti da due accordi maggiori, DO maggiore e FA maggiore, che variavano lungo la dimensione dell'altezza del suono. Erano presenti due accordi acuti (DO4-MI4-SOL4 e FA4-LA4-DO5) e due accordi gravi (DO1-MI1-SOL1 e FA1-LA1-DO2). In termini di altezza del suono erano dunque presenti una condizione generale che prevedeva due accordi acuti e due accordi gravi e una condizione di diverso livello di altezza in ognuna di queste due condizioni generali, cioè un suono più acuto e uno meno acuto, e un suono più grave e uno meno grave. Ogni accordo è stato registrato da un pianoforte acustico; il segnale audio è stato successivamente normalizzato al 75% mediante il software Adobe Audition e fatto ascoltare a un volume di circa 65 dB SPL attraverso cuffie professionali. I partecipanti rispondevano premendo alternativamente con la mano destra o sinistra uno di due tasti della tastiera del pc (F1 o F12) posti a destra e a sinistra del proprio piano medio sagittale. Le risposte venivano date con le mani incrociate (Figura 6.5), ossia, l'indice della mano sinistra premeva il tasto posto a destra del piano medio sagittale del soggetto (F12) e l'indice della mano destra premeva il tasto posto a sinistra del piano medio sagittale del soggetto (F1).

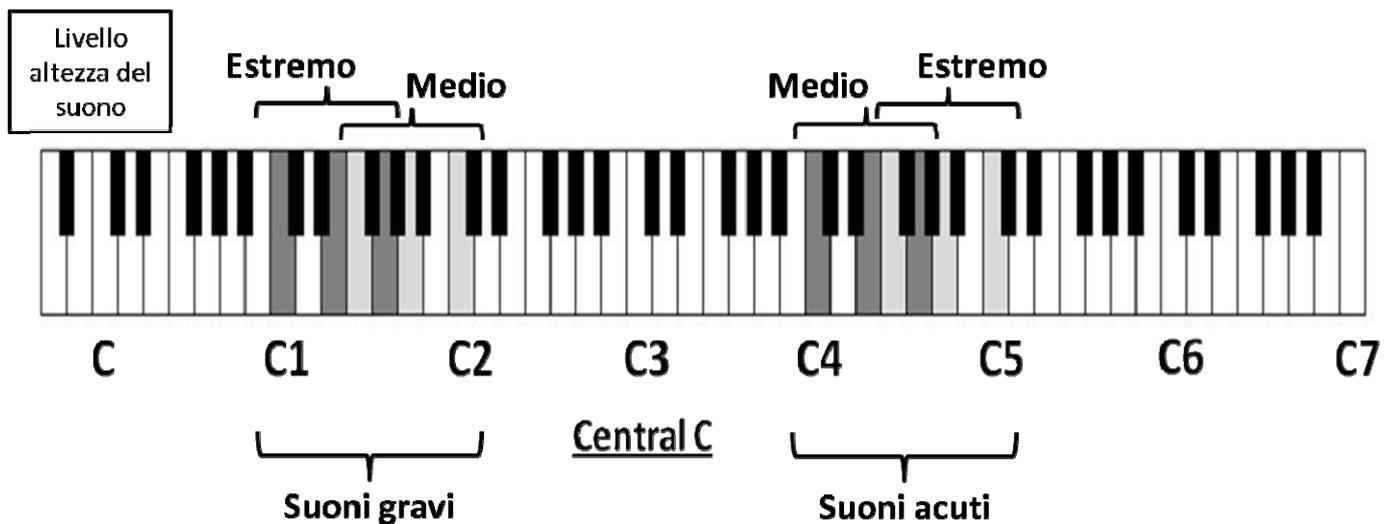


Figura 6.4. Distribuzione degli stimoli uditivi lungo la tastiera del pianoforte. I tasti di colore grigio scuro indicano gli accordi di DO maggiore, i tasti di colore grigio chiaro indicano gli accordi di FA maggiore. La lettera C indica la nota DO in notazione anglosassone, i numeri indicano, in progressione, l'altezza del suono dal grave all'acuto.

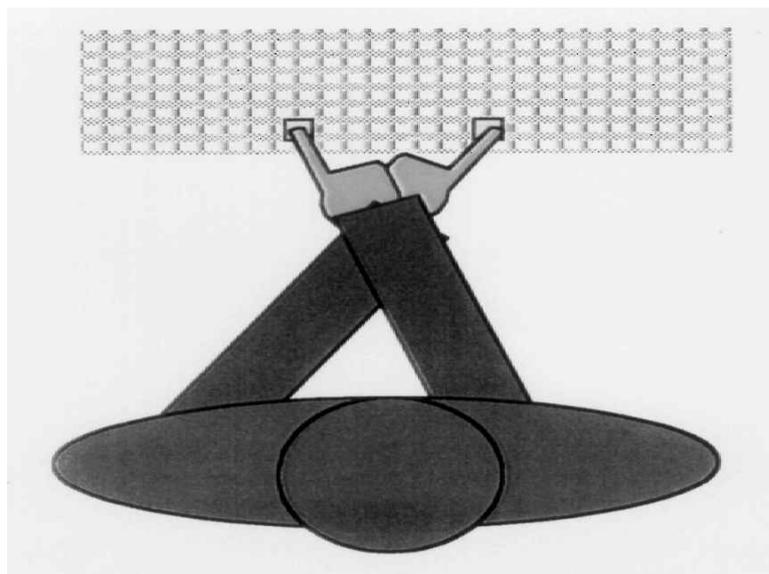


Figura 6.5. Modalità di risposta nell'esperimento 3. I partecipanti rispondevano con le mani incrociate. In questo modo, rispetto al piano medio sagittale del soggetto, la mano destra premeva un tasto posto nell'emicampo di sinistra e la mano sinistra un tasto posto nell'emicampo di destra.

Procedura

L'esaminatore descriveva il compito ai partecipanti spiegando loro che gli stimoli uditivi avevano il solo scopo di distrarre dal compito visivo principale, che non erano informativi e che andavano totalmente ignorati. Ogni trial iniziava con la presentazione di un punto di fissazione centrale per 500 ms, a questo seguiva la presentazione degli stimoli uditivi e visivi. Come nell'esperimento 1, gli

stimoli uditivi erano presentati 100 ms prima dello stimolo visivo, la loro durata massima era di 700 ms e sparivano quando il partecipante rispondeva premendo uno dei tasti di risposta. Lo stimolo visivo aveva una durata massima di 1000 ms, che costituiva la finestra temporale utile per fornire la risposta, e spariva non appena il partecipante rispondeva. Il compito dei partecipanti era di rispondere premendo un tasto con la mano destra o sinistra in funzione della forma della stimolo visivo. L'associazione tra mano di risposta, sinistra o destra, e forma della figura, rettangolo o cerchio, è stata controbilanciata tra i soggetti. I partecipanti rispondevano con le mani incrociate (Figura 6.5), ossia la mano destra premeva il tasto posto a sinistra del piano medio sagittale (F1) e la mano sinistra il tasto posto a destra del piano medio sagittale (F12).

La sessione sperimentale aveva la seguente struttura: un blocco di 20 trial di prova era seguito da 3 blocchi di 80 trial. Ogni blocco era composto dalla combinazione randomizzata dei due stimoli visivi e dei quattro stimoli uditivi. Alla fine di ogni singolo blocco il partecipante era invitato a riposarsi per qualche istante. L'intero esperimento durava circa 20 minuti.

Analisi dei dati

Sono stati analizzati solo i tempi di reazione (TR) delle risposte corrette. I trial con TR particolarmente lunghi (2 DS o più rispetto alla media dei TR per ogni soggetto e ogni condizione) o particolarmente brevi (inferiori a 200 ms) sono stati esclusi dalle analisi.

Vista la sostanziale sovrapposibilità dei risultati ottenuti nell'esperimento 1 usando la mediana o la media dei TR (vedi nota 1 nella sezione "Risultati" dell'Esperimento 1) anche in questo studio abbiamo deciso di usare quest'ultima come misura di tendenza centrale.

Analogamente allo studio 2, il disegno sperimentale era di tipo fattoriale entro i soggetti con il primo fattore, *Congruenza*, a due livelli (Congruente vs Incongruente), e il secondo fattore, *Livello altezza del suono*, anch'esso a due livelli (Estremo vs Medio). Per valutare la relazione di congruenza tra altezza del suono e risposta del soggetto è stato usato come punto di riferimento la mano di risposta e

non la posizione del tasto di risposta in funzione del piano medio sagittale del soggetto. In altre parole, sono state considerate Congruenti le associazioni suoni acuti/risposte della mano destra e suoni gravi/risposte della mano sinistra e Incongruenti le associazioni opposte.

6.3.3 Risultati

I partecipanti hanno commesso un basso numero di errori (3,8% sul totale dei trial), non è stata dunque eseguita una specifica analisi di questi ultimi. La presenza di una correlazione negativa tra i TR e la percentuale di errori commessi esclude la presenza di speed-accuracy trade-off ($r = -0,63$; $p < 0,05$). La tabella 6.2 riporta i TR medi espressi in funzione della condizione di congruenza e del livello di altezza del suono; viene inoltre riportata la differenza tra i TR per i due livelli di congruenza (Incongruente – Congruente) per i due livelli di altezza del suono.

Congruenza			
Livello	Congruente	Incongruente	Incongruente - Congruente
Estremo	427 ($\pm 74,83$)	424 ($\pm 75,31$)	-3
Medio	421 ($\pm 71,30$)	426 ($\pm 70,40$)	5

Tabella 6.2. TR medi (espressi in ms) e deviazioni standard in funzione della condizione di congruenza e del livello di altezza del suono.

I dati sono stati analizzati mediante un'ANOVA 2x2 a misure ripetute. Dai risultati non emerge alcun effetto principale o interazione tra fattori (tutti gli p erano superiori a 0,1). Come risulta evidente dai TR medi riportati nella tabella 6.2, le risposte alla condizione congruente non risultano significativamente diverse da quelle alla condizione incongruente.

6.3.4 Discussione

Nel presente esperimento abbiamo studiato il possibile coinvolgimento di rappresentazioni di natura spaziale nell'effetto di associazione tra altezza del suono e risposte della mano destra o sinistra nei

pianisti. I risultati mostrano che rispondendo con le mani incrociate l'effetto di associazione emerso negli esperimenti 1 e 2 scompare. Tale risultato è compatibile con una doppia rappresentazione dell'altezza del suono. Infatti, una rappresentazione totalmente motoria porterebbe a prevedere risposte più veloci per l'associazione mano destra/soni acuti e mano sinistra/soni gravi indipendentemente dalla posizione nello spazio in cui la mano agisce. Diversamente, una rappresentazione unicamente spaziale avrebbe comportato risposte più veloci per le associazioni tasto di destra/soni acuti e tasto di sinistra/soni gravi, indipendentemente dalla mano che agisce sul tasto. La presenza di una doppia rappresentazione porta a ipotizzare che se il compito sperimentale induce l'attivazione di entrambe le rappresentazioni, e queste hanno un gradiente opposto, allora ci si può aspettare che l'effetto scompaia. Quest'ultimo scenario è verosimilmente compatibile con quanto emerso da questo studio.

L'eventuale presenza di fattori confondenti che potrebbero aver influenzato il risultato, quali la non sistematicità dell'effetto di associazione o la difficoltà del compito, sono esclusi. Infatti, la solidità dell'effetto di associazione tra altezza del suono e mano di risposta per i pianisti è chiaramente suffragata dal suo emergere in modo sistematico in due studi sperimentali condotti con partecipanti diversi (Esperimenti 1 e 2). Inoltre, viste le abilità tecniche dei partecipanti è decisamente improbabile che il rispondere a mani incrociate abbia comportato una difficoltà tale da inficiare il compito. Infatti, la tecnica pianistica prevede l'uso dell'incrocio delle mani e qualsiasi studente di pianoforte già di livello medio è in grado di gestire tale componente tecnica senza difficoltà. Infine, dal momento che nell'esperimento 2 abbiamo dimostrato che l'effetto del suono sulla risposta manuale è costante nel tempo e non va incontro a decadimento, come avviene per l'effetto Simon, l'assenza di una qualsiasi associazione nelle risposte date con le mani incrociate non può essere accreditata a TR più lenti dipendenti dalla condizione di risposta.

Queste considerazioni ci spingono ad avvalorare l'ipotesi di una rappresentazione composita dell'altezza del suono nei pianisti che comprende tanto aspetti di natura motoria quanto aspetti di

natura spaziale. Negli esperimenti 1 e 2, in cui i soggetti rispondevano senza incrociare la mani, non era possibile separare l'eventuale influenza delle due componenti poiché entrambe prevedono un effetto che va nella stessa direzione. Il compito condotto a mani incrociate risulta dunque fondamentale per separare le due componenti. È stato dimostrato che l'emergere di un effetto di compatibilità stimolo-risposta è mediato dal sistema di riferimento attivato durante l'esecuzione del compito (Cho e Proctor, 2003) e che diversi frame of reference possono essere attivati e possono interagire tra loro (Carlson-Radvansky e Irwin, 1993), il risultato ottenuto in questo studio suggerisce la contemporanea attivazione di entrambe le forme di rappresentazione, spaziale e motoria, e il loro reciproco annullarsi.

6.4 Interazione uditivo-motoria e rappresentazioni spaziali nell'elaborazione dell'altezza del suono da parte di pianisti (Esperimento 4)

6.4.1 Introduzione

I risultati del precedente studio ci hanno fatto ipotizzare che l'elaborazione dell'altezza del suono da parte di pianisti preveda l'attivazione di una rappresentazione composta che comprende tanto aspetti di natura motoria legati all'atto necessario a produrre suoni con le medesime caratteristiche, quanto aspetti di natura spaziale astratta sulla base dei quali i suoni acuti sono rappresentati nello spazio rappresentazionale destro e i suoni gravi nello spazio sinistro (Rusconi et al., 2006).

L'obiettivo di questo studio è di verificare ulteriormente questa ipotesi mediante una manipolazione sperimentale che possa separare il contributo della rappresentazione motoria da quello della rappresentazione spaziale. A questo scopo abbiamo chiesto ai partecipanti, un nuovo gruppo di pianisti, di sottoporsi a un compito identico a quello dell'esperimento 1 con la sola differenza che le risposte venivano date premendo, con il piede destro o sinistro, due pedali, uno posto a destra e uno a sinistra del piano medio sagittale del soggetto. Se l'effetto di associazione emerso negli esperimenti 1 e 2 è mediato unicamente dall'attivazione di una rappresentazione motoria effettore-specifica, ossia legata al gesto che solitamente un pianista fa per eseguire suoni acuti o gravi sul pianoforte, allora nelle risposte con i piedi non ci aspettiamo alcun effetto di associazione, infatti, seppure i pianisti usano dei pedali per suonare il loro strumento, la funzione di questi è unicamente associata al prolungamento di un suono o alla gestione della dinamica, elementi del tutto estranei alla dimensione dell'altezza del suono. Se l'effetto comporta invece anche una componente spaziale, rispondere con un effettore cui non è associata alcuna rappresentazione motoria relativa all'esecuzione di gesti atti a produrre suoni di altezza diversa dovrebbe far emergere l'effetto di associazione e questo non potrebbe che essere mediato dalla componente spaziale, svincolata, in questo caso, da quella motoria.

6.4.2 Materiali e Metodi

Partecipanti

In questo studio hanno partecipato 12 pianisti (7 femmine e 5 maschi) reclutati presso il Conservatorio di Musica G. Verdi di Como, l'istituto musicale pareggiato Vittadini di Pavia e l'Università di Milano-Bicocca. Nessuno di loro ha preso parte ai precedenti esperimenti. Tutti i partecipanti erano destrimani sulla base della somministrazione della Scala di dominanza manuale di Edimburgo (Oldfield 1971). L'età media dei partecipanti era di 34,4 anni ($\pm 7,3$). Il numero medio di anni di pratica strumentale era di 26,6 ($\pm 7,5$). Il numero medio di ore a settimana passate a studiare o suonare il pianoforte era di 12,9 ($\pm 13,8$).

Materiali

L'esperimento è stato condotto in una stanza scarsamente illuminata e isolata acusticamente. I partecipanti sedevano a circa 60 cm dallo schermo di un pc della grandezza di 15,4". La presentazione degli stimoli e la registrazione dei Tempi di Reazione (TR) erano controllate per mezzo del software E-prime (version 1.2, Psychological Tools, Inc).

Gli stimoli visivi utilizzati erano un simbolo di addizione di colore nero (punto di fissazione centrale) e due figure geometriche di colore verde (un rettangolo di $5^\circ \times 2,5^\circ$ di angolo visivo e un cerchio con un diametro di $3,4^\circ$ di angolo visivo) proiettate al centro dello schermo su sfondo bianco. Gli stimoli uditivi (vedi Figura 6.6) erano composti da due accordi maggiori, DO maggiore e FA maggiore, che variavano lungo la dimensione dell'altezza del suono. Sono stati scelti due accordi acuti (DO4-MI4-SOL4 e FA4-LA4-DO5) e due accordi gravi (DO1-MI1-SOL1 e FA1-LA1-DO2). In termini di altezza del suono erano dunque presenti una condizione generale che prevedeva due accordi acuti e due accordi gravi e una condizione di diverso livello di altezza in ognuna di queste due condizioni generali, cioè un suono più acuto e uno meno acuto, e un suono più grave e uno meno grave. Ogni accordo è stato registrato da un pianoforte acustico; il segnale audio è stato successivamente

normalizzato al 75% mediante il software Adobe Audition e fatto ascoltare a un volume di circa 65 dB SPL attraverso cuffie professionali. I partecipanti rispondevano premendo alternativamente uno di due pedali posti a destra e a sinistra del proprio piano medio sagittale.

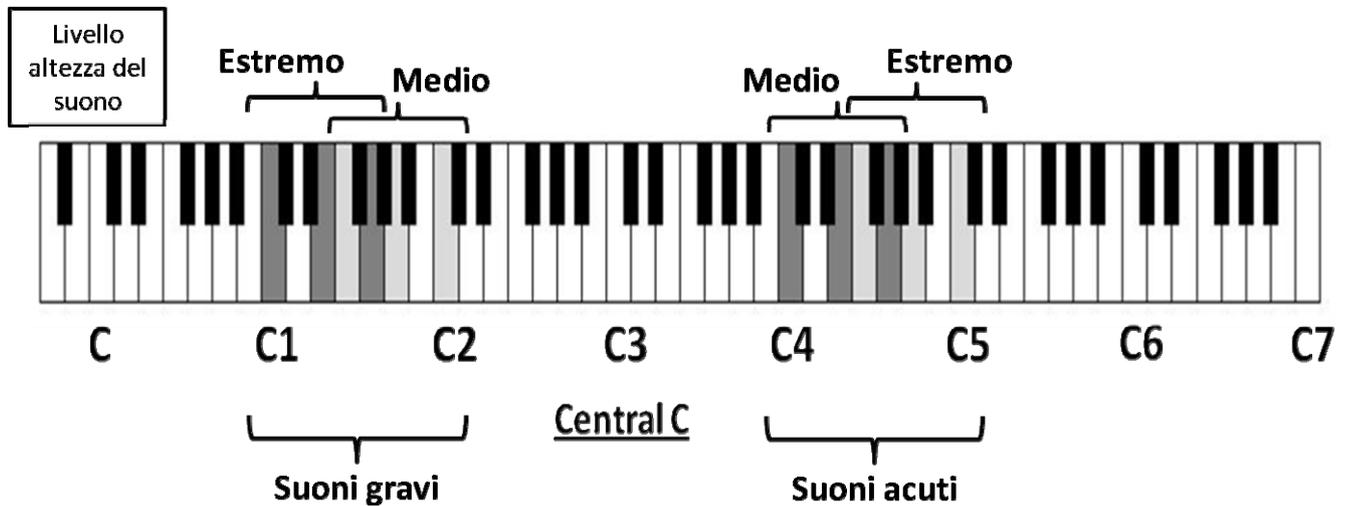


Figura 6.6. Distribuzione degli stimoli uditivi lungo la tastiera del pianoforte. I tasti di colore grigio scuro indicano gli accordi di DO maggiore, i tasti di colore grigio chiaro indicano gli accordi di FA maggiore. La lettera C indica la nota DO in notazione anglosassone, i numeri indicano, in progressione, l'altezza del suono dal grave all'acuto.

Procedura

L'esaminatore descriveva il compito ai partecipanti spiegando loro che gli stimoli uditivi avevano il solo scopo di distrarre dal compito visivo principale, che non erano informativi e che andavano totalmente ignorati. Ogni trial iniziava con la presentazione di un punto di fissazione centrale per 500 ms, a questo seguiva la presentazione degli stimoli uditivi e visivi. Come nell'esperimento 1, gli stimoli uditivi erano presentati 100 ms prima dello stimolo visivo, la loro durata massima era di 700 ms e sparivano quando il partecipante rispondeva premendo uno dei due pedali. Lo stimolo visivo aveva una durata massima di 1000 ms, che costituiva la finestra temporale utile per fornire la risposta, e spariva non appena il partecipante rispondeva. Il compito dei partecipanti era di rispondere premendo con il piede sinistro o destro un pedale in funzione della forma della stimolo visivo. Vi erano due pedali, uno per ogni piede, posti a sinistra e a destra del piano medio sagittale del

soggetto. L'associazione tra piede di risposta, sinistro o destro, e forma della figura, rettangolo o cerchio, è stata controbilanciata tra i soggetti.

La sessione sperimentale aveva la seguente struttura: un blocco di 20 trial di prova era seguito da 3 blocchi di 80 trial. Ogni blocco era composto dalla combinazione randomizzata dei due stimoli visivi e dei quattro stimoli uditivi. Alla fine di ogni singolo blocco il partecipante era invitato a riposarsi per qualche istante. L'intero esperimento durava circa 20 minuti.

Analisi dei dati

Sono stati analizzati solo i tempi di reazione (TR) delle risposte corrette. I trial con TR particolarmente lunghi (2 DS o più rispetto alla media dei TR per ogni soggetto e ogni condizione) o particolarmente brevi (inferiori a 200 ms) sono stati esclusi dalle analisi.

Vista la sostanziale sovrapposibilità dei risultati ottenuti nell'esperimento 1 usando la mediana o la media dei TR (vedi nota 1 nella sezione "Risultati" dell'Esperimento 1) anche in questo studio abbiamo deciso di usare quest'ultima come misura di tendenza centrale.

Analogamente agli esperimenti 2 e 3, il disegno sperimentale era di tipo fattoriale entro i soggetti con il primo fattore, *Congruenza*, a due livelli (Congruente vs Incongruente), e il secondo fattore, *Livello altezza del suono*, anch'esso a due livelli (Estremo vs Medio).

6.4.3 Risultati

I partecipanti hanno commesso un basso numero di errori (2,7% sul totale dei trial), non è stata dunque eseguita una specifica analisi di questi ultimi. La presenza di una correlazione negativa tra i TR e la percentuale di errori commessi esclude la presenza di speed-accuracy trade-off ($r = -0,609$; $p < 0.05$). La tabella 6.3 riporta i TR medi espressi in funzione della condizione di congruenza e del

livello di altezza del suono; viene inoltre riportata la differenza tra i TR per i due livelli di congruenza (Incongruente – Congruente) in funzione del livello di altezza del suono.

Congruenza			
Livello	Congruente	Incongruente	Incongruente - Congruente
Estremo	382 (\pm 42,94)	396 (\pm 36,42)	14
Medio	387 (\pm 38,29)	393 (\pm 38,93)	6

Tabella 6.3. TR medi (espressi in ms) e deviazioni standard in funzione della condizione di congruenza e del livello di altezza del suono.

I dati sono stati analizzati mediante una ANOVA 2x2 a misure ripetute. I risultati mostrano la presenza di un effetto principale per il fattore *Congruenza* [$F(1, 23) = 11,98, p < 0,01$ (Correzione Lower-bound)]. Globalmente i TR per la condizione congruente sono inferiori rispetto a quelli per la condizione incongruente (384 ms vs 394 ms rispettivamente). Ciò indica una chiara associazione tra risposte del piede destro e suoni acuti e risposte del piede sinistro e suoni gravi. Emerge inoltre una tendenza alla significatività nell'interazione tra i fattori *Congruenza* e *Livello altezza del suono* [$F(1, 23) = 3,21, p = 0,08$ (Correzione Lower-bound)]. Tale risultato indica che l'effetto di congruenza viene modulato dal livello di altezza del suono (Figura 6.7), in particolare, il vantaggio nei TR per la condizione congruente rispetto alla incongruente risulta maggiore quando i partecipanti ascoltano un suono estremo (14 ms) rispetto a quando ascoltano un suono medio (6 ms). Nessun altro effetto è emerso dall'ANOVA.

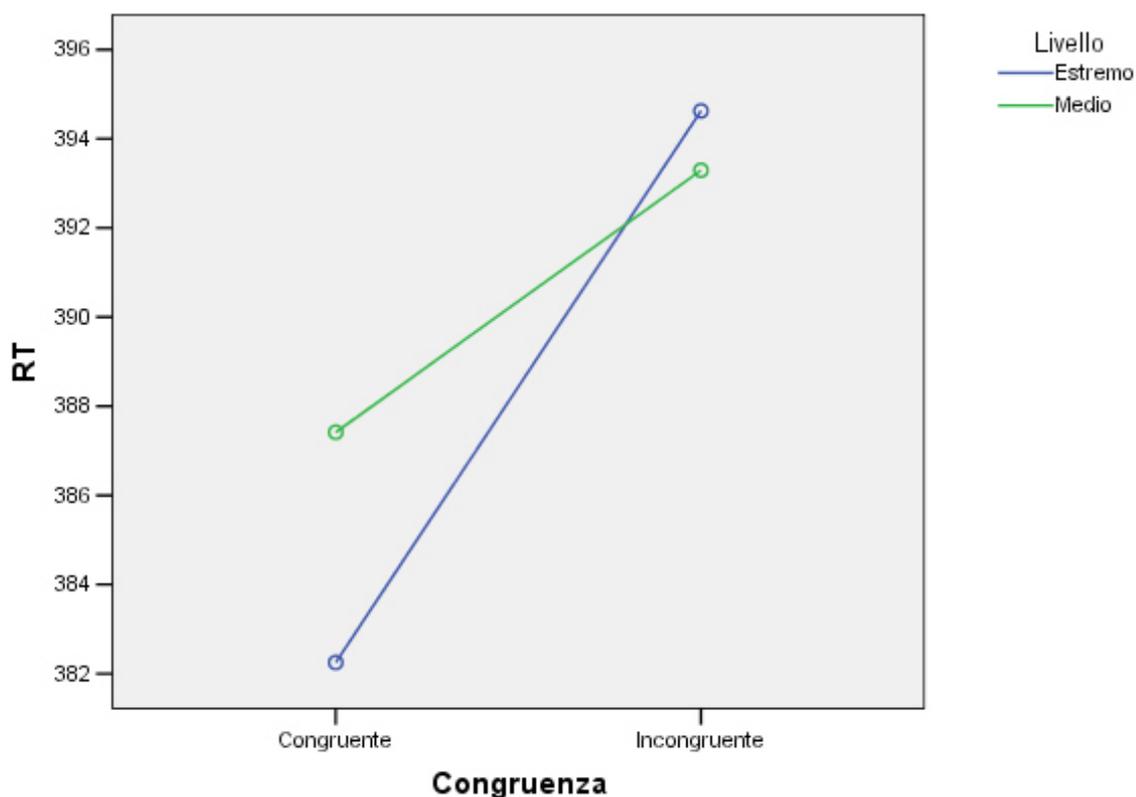


Figura 6.7. Grafico dell'interazione tra i fattori Congruenza e Livello del suono.

6.4.4 Discussione

Nel presente studio abbiamo indagato l'ipotesi che l'elaborazione dell'altezza dei suoni nei pianisti coinvolga una rappresentazione composita che comprende tanto aspetti di natura motoria quanto aspetti di natura spaziale. A questo scopo un gruppo di pianisti è stato sottoposto a un compito identico a quello usato negli esperimenti 1 e 3, con la sola differenza che le risposte venivano date premendo due pedali anziché due tasti. Questa manipolazione aveva lo scopo di separare il possibile contributo che la componente motoria della rappresentazione poteva avere nel far emergere l'effetto di associazione tra altezza del suono e risposta lateralizzata destra/sinistra.

I risultati mostrano che esiste una chiara associazione tra risposta del piede destro e suoni acuti e risposta del piede sinistro e suoni gravi. In particolare le risposte con il piede destro sono più veloci

in seguito all'elaborazione di suoni acuti rispetto ai gravi, mentre le risposte con il piede sinistro sono più veloci in seguito all'elaborazione di suoni gravi rispetto agli acuti. L'effetto di associazione è inoltre modulato dal livello di altezza del suono, ossia è maggiore quando i suoni sono estremi (molto acuti o molto gravi) e minore quando i suoni sono medi. Quest'ultimo risultato è solo tendenziale poiché non raggiunge la significatività statistica, tuttavia emerge in modo sistematico (è infatti presente anche negli esperimenti 1 e 2).

L'ipotesi interpretativa che abbiamo proposto nell'esperimento 1 per spiegare l'effetto di associazione tra risposte della mano destra e suoni acuti e risposte della mano sinistra e suoni gravi era incentrata sul possesso, da parte dei pianisti, di un repertorio motorio specifico per il proprio strumento. Secondo la TEC, stimoli precedentemente sperimentati come effetto di un'azione possono successivamente attivare la rappresentazione dell'azione che li aveva generati (Hommel, 2009). Nel nostro studio, solo i pianisti possedevano un repertorio motorio che associa suoni acuti a gesti della mano destra e suoni gravi a gesti della mano sinistra. Infatti, durante lo studio del pianoforte ogni pianista impara che l'esecuzione di gesti della mano destra genera suoni medio-acuti e l'esecuzione di gesti della mano sinistra genera suoni medio-gravi. Questa relazione tra gesto e altezza del suono è legata alle caratteristiche strutturali del pianoforte, dove i suoni gravi si distribuiscono sulla sinistra della tastiera e quelli acuti sulla destra, e il procedere dei suoni dal grave all'acuto segue una progressione continua composta da intervalli di semitono (che corrisponde alla distanza minima tra due suoni contigui sulla tastiera del pianoforte, quando quest'ultimo è accordato secondo il sistema temperato).

I risultati dell'esperimento 3 suggerivano la contemporanea presenza di una rappresentazione di natura spaziale oltre a quella di natura motoria. Infatti, se l'effetto fosse dipeso unicamente da una rappresentazione che associa l'altezza del suono alla mano di risposta, allora la posizione spaziale della mano durante le risposte non avrebbe dovuto influenzare l'effetto di associazione. Tuttavia, quando i pianisti, come nell'esperimento 3, rispondevano incrociando le mani, ossia premendo il tasto di sinistra con la mano destra e quello di destra con la sinistra, l'effetto scompariva.

Evidentemente, ciò è la conseguenza di un conflitto tra le due forme di rappresentazione i cui effetti si annullano tra loro (Carlson-Radvansky e Irwin, 1993).

I risultati ottenuti in questo studio avvalorano ulteriormente l'ipotesi di una rappresentazione composita motoria e spaziale insieme. Infatti, una rappresentazione unicamente motoria dipendente dal repertorio gestuale appreso suonando il pianoforte non avrebbe dovuto generare alcun tipo di effetto con il compito usato in questo esperimento. Sebbene i pianisti usino due pedali suonando il loro strumento, questi non hanno alcuna relazione con la gestione dell'altezza del suono, essendo coinvolti in aspetti legati alla durata del suono e alla dinamica. Dunque, nessuna relazione è ipotizzabile tra azioni del piede destro e suoni acuti e azioni del piede sinistro e suoni gravi. Data l'assenza di questa relazione, i risultati emersi possono essere interpretati solo come il frutto di un processo mentale che mappa la dimensione dell'altezza in termini spaziali, localizzando i suoni acuti in uno spazio rappresentazionale destro e quelli gravi in uno spazio sinistro (Rusconi e coll., 2006; Lidji e coll., 2007).

6.5 Discussione generale

L'obiettivo di questa ricerca è stato valutare se l'elaborazione dell'altezza del suono da parte di pianisti generi effetti di interazione uditivo-motoria (Zatorre e coll., 2007). I pianisti costituiscono un gruppo sperimentale ideale per valutare questo tipo di fenomeno poiché il mapping tra gesto eseguito sulla tastiera e altezza del suono generato è tale per cui i suoni acuti sono prevalentemente associati a gesti della mano destra e i suoni gravi a gesti della mano sinistra. Inoltre, la localizzazione spaziale del suono generato dallo strumento possiede anch'essa una marcatura spaziale ben definita. Infatti, i suoi acuti vengono prodotti da corde posizionate a destra dell'esecutore e i suoni gravi da corde posizionate a sinistra.

I risultati ottenuti mostrano chiaramente che solo nei pianisti l'elaborazione di accordi acuti o gravi è associata, rispettivamente, a risposte più veloci della mano destra o della mano sinistra (esperimenti 1 e 2), suggerendo dunque che l'analisi dell'altezza del suono genera in essi fenomeni di interazione uditivo-motoria. L'assenza di questi ultimi nel gruppo di musicisti non-pianisti e nel gruppo di non-musicisti (esperimento 1) avvalora l'ipotesi che l'effetto sia mediato da una componente motoria appresa. Solo i pianisti possiedono un repertorio motorio che associa i gesti della mano destra ai suoni acuti e quelli della mano sinistra ai suoni gravi. Lo sviluppo di un siffatto repertorio motorio dipende direttamente dalla modalità in cui l'altezza del suono è organizzata sulla tastiera del pianoforte (suoni gravi a sinistra e suoni acuti a destra). I musicisti non-pianisti condividono con i pianisti una serie di conoscenze teoriche riguardanti la musica, ma non le competenze strettamente legate agli aspetti tecnico-motori dell'esecuzione al pianoforte. L'assenza di un effetto nel gruppo dei musicisti non-pianisti costituisce dunque una prova importante per interpretare in termini motori i risultati emersi. Inoltre, l'assenza dell'effetto nel gruppo di non musicisti avvalora l'idea che il processo alla base del fenomeno sia appreso.

L'effetto emerge in modo del tutto automatico, senza la necessità che si presti esplicitamente attenzione allo stimolo uditivo. Questo suggerisce che l'accesso a queste rappresentazioni non richieda un'allocazione volontaria dell'attenzione.

Secondo la TEC (Hommel e coll., 2001) stimoli precedentemente sperimentati come effetto di un'azione possono successivamente attivare, in modo automatico, la rappresentazione dell'azione che li aveva generati (Hommel, 2009). Nel nostro studio, solo i pianisti possedevano un repertorio motorio che associa suoni acuti a gesti della mano destra e suoni gravi a gesti della mano sinistra. Infatti, durante lo studio del pianoforte ogni pianista impara che l'esecuzione di gesti della mano destra genera suoni medio-acuti e l'esecuzione di gesti della mano sinistra genera suoni medio-gravi. Questa relazione tra gesto e altezza del suono è legata alle caratteristiche strutturali del pianoforte, dove i suoni gravi si distribuiscono sulla sinistra della tastiera e quelli acuti sulla destra, e il procedere dei suoni dal grave all'acuto segue una progressione continua composta da intervalli di semitono (che corrisponde alla distanza minima tra due suoni contigui sulla tastiera del pianoforte, quando quest'ultimo è accordato secondo il sistema temperato). I risultati dell'esperimento 1, replicati nell'esperimento 2, possono essere interpretati all'interno del modello teorico della TEC.

Se si accetta questa interpretazione, essa comporta che l'effetto emerso avvenga a un livello rappresentazionale e non a un livello periferico quale ad esempio la codifica sensoriale o la selezione della risposta motoria. Ma quali prove abbiamo per avvalorare questa ipotesi? La dinamica temporale dell'effetto emerso possiede caratteristiche specifiche. Infatti, l'ascolto di un accordo acuto o grave facilita, rispettivamente, risposte della mano destra o sinistra entro una finestra temporale di 400 ms precedenti alla risposta motoria (esperimento 2) e l'effetto non tende a decadere nel corso del tempo. Questo suggerisce che il processo mentale alla base del riscontrato effetto di interazione uditivo-motoria è diverso da quello che produce un noto effetto di associazione stimolo-risposta: l'effetto Simon. L'effetto Simon emerge quando la posizione spaziale in cui uno stimolo visivo o uditivo viene presentato ha un effetto sulla velocità delle risposte motorie pur essendo irrilevante per il compito. In particolare, le risposte della mano destra sono più veloci quando uno stimolo è presentato

nell'emicampo destro rispetto al sinistro, viceversa, le risposte della mano sinistra sono più veloci nella condizione opposta (Lu e Proctor, 1995). È ormai ampiamente verificato che l'effetto Simon emerge a livello di selezione della risposta (Hommel, 1993; Kornblum e coll., 1990). È inoltre dimostrato che in compiti di tipo Simon l'attivazione del codice spaziale mediata dalla posizione dello stimolo (irrilevante per il compito ma fondamentale per l'emergere dell'effetto Simon) decade velocemente entro una finestra temporale di 200 ms dall'apparizione dello stimolo stesso determinando la scomparsa dell'effetto Simon (Hommel 1994). È altresì noto che in fenomeni di compatibilità stimolo-risposta quali ad esempio l'effetto di Spatial Number Association of Response Compatibility (SNARC-effect, Dehaene e coll., 1993) o l'effetto di Affordance (Tucker e Ellis, 1998), per i quali è stato dimostrato che avvengono a un livello rappresentazionale mediante la ricodifica in termini spaziali di una dimensione non spaziale, è assente il veloce decadimento temporale della caratteristica dello stimolo che genera l'effetto (Rusconi e coll., 2003, Phillips e Ward, 2002). I risultati dell'esperimento 2 suggeriscono dunque che l'effetto di interazione uditivo-motoria emerso con i pianisti avvenga a livello rappresentazionale e non a un livello periferico di codifica sensoriale o selezione della risposta motoria, questo perché la sua dinamica temporale lo accomuna più agli effetti di tipo SNARC o Affordance che a quelli di tipo Simon.

Gli esperimenti 1 e 2 non escludono tuttavia un possibile ruolo, nei pianisti, di una codifica di tipo spaziale dell'altezza del suono oltre alla codifica "motoria". Negli esperimenti 3 e 4 abbiamo dimostrato l'esistenza di tale codifica. Infatti, l'effetto di interazione sparisce se i pianisti rispondono incrociando le mani ed è invece presente se i pianisti rispondono con i piedi. Il primo risultato suggerisce la presenza di un'interazione tra rappresentazione motoria e spaziale che, attraverso un meccanismo di conflitto generato dal rispondere incrociando le mani, genera una reciproca cancellazione degli effetti mediati dalle due componenti opposte (Carlson-Radvansky e Irwin, 1993). Il secondo risultato conferma d'altra parte la presenza di una rappresentazione spaziale che, separata da quella motoria attraverso la manipolazione sperimentale adottata (per i pianisti l'azione sui pedali non è associata al controllo dell'altezza del suono e dunque, diversamente che dalle mani, non vi è

alcuna associazione di tipo motorio) permette l'emergere di un'associazione tra risposte del piede destro e suoni acuti e risposte del piede sinistro e suoni gravi attraverso una ricodifica della dimensione dell'altezza del suono in termini spaziali rappresentazionali con i suoni acuti situati a destra e quelli gravi a sinistra (Rusconi e coll., 2006; Lidji e coll., 2007).

Concludendo, la presente ricerca ha dimostrato che l'elaborazione di suoni con diversa altezza può generare, nei pianisti, effetti di interazione uditivo-motoria, ossia l'attivazione di rappresentazioni motorie precedentemente associate, per mezzo di un processo di apprendimento, a un determinato effetto sensoriale (suoni acuti o gravi nel nostro caso). Ciò suggerisce che la rappresentazione dell'altezza dei suoni comprenda, almeno in parte, degli aspetti di natura motoria. Abbiamo altresì rilevato che tale rappresentazione viene verosimilmente codificata anche in termini spaziali. Complessivamente, il quadro che emerge suggerisce che a livello cognitivo l'altezza del suono venga rappresentata dai pianisti mediante una rappresentazione composita che comprende elementi spaziali e motori entrambe verosimilmente influenzati dall'interazione con il proprio strumento.

7 Basi neurali dell'elaborazione delle diverse sottocomponenti del ritmo musicale

7.1 Introduzione

Recenti sviluppi della ricerca nell'ambito della psicologia sperimentale e dello sviluppo cognitivo, delle neuroimmagini e della neurologia comportamentale (McDermott e Hauser, 2005; Desain e Windsor, 2000; Hallam e coll., 2009) dimostrano che le esperienze musicali coinvolgono in modo profondo e complesso diverse funzioni mentali e, di conseguenza, cerebrali. L'elaborazione della musica spesso implica una complessa interazione tra processi percettivi, cognitivi, motori e affettivi (Levitin e Tirovolas, 2009). Inoltre, come suggerito da recenti studi neuropsicologici e di neuroimaging funzionale, sistemi neurali distinti sono coinvolti nell'analisi degli aspetti melodici, armonici, timbrici e ritmici della musica (Parsons e coll., in preparazione; Peretz e Zatorre, 2005; Stewart e coll., 2006).

Un aspetto fondamentale della musica è la struttura temporale della sequenza di suoni che compone una melodia. Solitamente ci si riferisce a questa struttura definendola in termini molto generali come "ritmo musicale", il quale, tuttavia, non costituisce un elemento unico ma è caratterizzato da più componenti (Pattern ritmico, Metro, Tempo) che interagiscono tra loro per generare la struttura temporale di un brano musicale (vedi sezione 5.2 per maggiori dettagli).

Recenti indagini nell'ambito della psicologia evolutiva hanno esaminato una varietà di aspetti legati all'elaborazione del ritmo musicale. I risultati suggeriscono che le informazioni metriche possono essere rilevate anche da bambini molto piccoli (Winkler e coll., 2009; Hannon e Trehub, 2005). Inoltre, è emerso che i neonati sono in grado di estrarre una struttura ritmica da stimoli uditivi diversi (Trehub e Thorpe, 1989) e di rilevare piccole variazioni di durata (Morrongiello e Trehub, 1987) e di tempo (Baruch e Drake, 1997) in stimoli acustici.

Studi di neuroimaging funzionale suggeriscono distinti sistemi neurali alla base della percezione e produzione di pattern ritmici rispetto all'elaborazione dell'altezza del suono, della melodia, del timbro e dell'armonia. Una ricerca condotta da Platel e colleghi (1997) ha ipotizzato un ruolo dell'insula sinistra e dell'area di Broca nella discriminazione percettiva e nell'ascolto passivo di coppie di brevi pattern ritmici. Un successivo studio condotto con partecipanti non-musicisti che ascoltavano passivamente ritmi musicali ha evidenziato l'attivazione del planum temporale bilaterale, dell'area supplementare motoria sinistra, dell'area pre-motoria bilaterale e del lobulo VI del cervelletto (Chen e coll., 2008), suggerendo un forte coinvolgimento delle aree motorie nell'elaborazione del ritmo. Tale evidenza è stata confermata da un successivo studio fMRI condotto con non-musicisti che ascoltavano passivamente pattern ritmici isocronici, metrici e non metrici (Bengtsson e coll., 2009). Quest'ultimo studio ha evidenziato attivazioni nella corteccia pre-motoria dorsale, nell'area supplementare motoria e pre-supplementare motoria e nel cervelletto durante l'ascolto di sequenze ritmiche prevedibili (ritmi isocronici); maggiore attivazione della corteccia prefrontale superiore emerge invece durante l'ascolto di pattern più complessi (stimoli non metrici). Queste evidenze appaiono congruenti con altri studi che hanno valutato la riproduzione di pattern ritmici in compiti di tapping (Ullen e coll., 2003; Oullier e coll., 2005) e suggeriscono che le aree coinvolte nella produzione di comportamenti motori ritmici contribuiscano anche alla percezione del ritmo.

Una linea di ricerca di neuroimmagini collegata alla precedente, ma con implicazioni solo indirette in ambito musicale, si è focalizzata sullo studio delle basi neurali coinvolte nella percezione degli aspetti temporali di stimoli visivi o uditivi. Uno studio fMRI condotto con partecipanti non-musicisti che discriminavano stimoli uditivi ha evidenziato attivazioni della corteccia parietale inferiore destra, bilaterale premotoria, e dorso-laterale prefrontale, risultato interpretato come espressione, rispettivamente, della focalizzazione dell'attenzione verso la variabile tempo, dell'attivazione della working memory e del processo di comparazione degli intervalli temporali (Rao e coll., 2001). Altri studi di neuroimmagine dello stesso tipo hanno suggerito il ruolo dei gangli della base e delle aree

prefrontali, pre-motorie e del cervelletto in processi di stima esplicita del tempo, e delle regioni parietali inferiori e pre-motorie nei processi basati sull'attesa (Coull e Nombro, 2008; Coull, 2009, Lewis e Miall, 2003; Smith e coll., 2003).

Diversi studi neuropsicologici hanno indagato la percezione del ritmo e del tempo. Una linea di ricerca ha esaminato la dissociazione tra l'elaborazione del ritmo e l'elaborazione della melodia. Questi studi dimostrano che l'elaborazione di un pattern ritmico o del metro possono essere risparmiate in pazienti con deficit nell'elaborazione di melodie (Peretz e Kolinsky, 1993; Foxton e coll., 2006). Un'altra linea di ricerca ha esaminato l'elaborazione dei pattern ritmici rispetto all'elaborazione del metro rilevando la presenza di una doppia dissociazione tra i due. Infatti è stato dimostrato sia che l'elaborazione del metro può essere risparmiata in presenza di un deficit di elaborazione di pattern ritmici (Peretz, 1990; Di Pietro e coll., 2004) sia il deficit opposto (Liégeois-Chauvel e coll., 1998). Gli stessi studi suggeriscono un ruolo del lobulo parietale inferiore nell'elaborazione dei pattern ritmici (Di Pietro e coll., 2004) e del giro temporale superiore (Liégeois-Chauvel e coll., 1998) nell'elaborazione del metro, anche se tali ipotesi risultano tutt'altro che univoche (Stewart e coll., 2009). Studi neuropsicologici riguardanti l'elaborazione degli aspetti temporali di uno stimolo hanno dimostrato un coinvolgimento di circuiti dell'emisfero destro a livello del lobo parietale inferiore, dell'area pre-motoria e di aree prefrontali (Harrington e coll., 1998), verosimilmente legate a processi attentivi e di working memory utili alla percezione della durata di stimoli uditivi. Altre linee di ricerca neuropsicologica suggeriscono un possibile ruolo del cervelletto nella percezione della durata di stimoli uditivi, ma le evidenze sono contraddittorie. Un set di pazienti supporta questa ipotesi (Ivry e coll., 2002; Grube e coll., in corso di pubblicazione) altri no (Harrington e coll., 2004a e 2004b).

Il presente studio ha lo scopo di indagare in modo più completo la neuroanatomia funzionale legata alla rappresentazione mentale del ritmo musicale. In particolare, il nostro obiettivo è quello di isolare e comparare le basi neurali che sottostanno all'elaborazione del metro, del ritmo e del tempo.

L'enfasi è posta su stimoli musicali naturali con caratteristiche presenti universalmente in tutte le culture, piuttosto che in stimoli isocronici o sequenze ritmiche non musicali. Inoltre, il nostro obiettivo è di caratterizzare questi sottosistemi a diversi livelli di competenza musicale, sia in musicisti che in non-musicisti, con compiti paragonabili tra loro. I meccanismi neurali associati alle diverse sottocomponenti del ritmo musicale sono stati comparati a quelli presenti nell'elaborazione di melodie al fine di confrontare queste condizioni attraverso un compito simile sugli stessi soggetti. Infine abbiamo valutato i meccanismi per l'elaborazione della melodia nei musicisti comparando questi con quelli ottenuti nei non musicisti.

Nello studio abbiamo usato la Tomografia a Emissione di Positroni (PET) per misurare l'attività funzionale del cervello di musicisti e non-musicisti durante un compito di discriminazione uguale-diverso di coppie di stimoli uditivi. Abbiamo esaminato selettivamente la percezione di Pattern, Metro (ad es. la differenziazione tra $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{4}$, $\frac{5}{4}$, $\frac{5}{8}$) e Tempo (modificazioni dinamiche della velocità). Abbiamo anche introdotto un compito di discriminazione di melodie diverse nel quale i soggetti dovevano giudicare se una coppia di melodie isocroniche variavano rispetto all'altezza dei suoni. Dunque, gli stimoli dei compiti ritmici hanno un'altezza del suono costante ma variano in termini di Metro, Pattern e Tempo, mentre il compito melodico ha Metro, Pattern e Tempo costanti con variazione dell'altezza di alcuni suoni della melodia. Inoltre, abbiamo indagato questi compiti in funzione delle competenze dei partecipanti, includendo musicisti e non-musicisti. Il compito e gli stimoli sono stati selezionati in modo tale che musicisti e non-musicisti avessero una prestazione simile in termini di accuratezza. I risultati suggeriscono un'organizzazione funzionale diversa per ogni componente del ritmo musicale indagata e per la melodia.

7.2 Materiali e Metodi

Partecipanti. Allo studio hanno partecipato 5 Musicisti (età media 35 anni, range 26-44) e 5 Non-musicisti (età media 23 anni, range 19-27). I Musicisti avevano in media 10 anni di studi musicali alle spalle. I Non-musicisti erano studenti universitari senza nessuna competenza specifica in ambito musicale.

Stimoli. Gli stimoli nei compiti Pattern e Melodia sono stati costruiti sulla base del Seashore Test (Seashore, 1938). Gli stimoli nei compiti Metro e Tempo sono stati costruiti sulla base del Gordon Musical Aptitude Profile (Gordon, 1965). Gli stimoli erano composti da suoni con timbro di pianoforte, dell'altezza di 440 Hertz (per la condizione melodia si sono usati due ulteriori stimoli dell'altezza di 415 e 466 Hertz) e della durata di 231 o 462 ms. L'intervallo fra un suono e l'altro di una sequenza di stimoli era un multiplo di 231 ms. In media ogni sequenza di stimoli durava 14 secondi. La distanza temporale tra due stimoli dello stesso trial era di 1000 ms e quella tra un trial e l'altro di 1750 ms. Il paradigma sperimentale prevedeva 4 condizioni sperimentali: Pattern, Metro, Tempo e Melodia. Ogni condizione comprendeva, per ogni trial, due sequenze di suoni, per le quali il partecipante doveva dare un giudizio uguale/diverso. Nei trial in cui le due sequenze era diverse (vedi figura 7.1) le modifiche potevano riguardare: la struttura ritmica delle due sequenze (Pattern), ossia la durata delle singole unità ascoltate; la struttura metrica delle due sequenze (Metro), ossia la successione di accenti forti e deboli; l'eventuale presenza di accelerazioni o rallentamenti nella scansione temporale della sequenza (Tempo); l'altezza dei suoni che componevano la sequenza (Melodia).

a. Pattern



b. Metro



c. Tempo

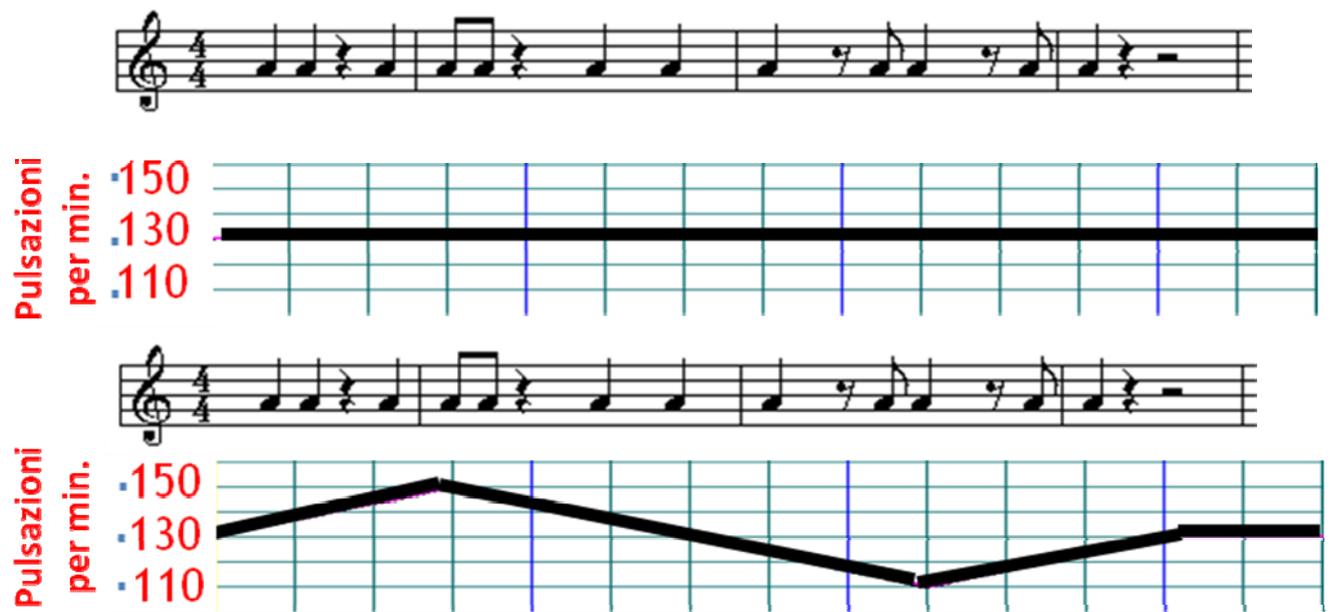


Figura 7.1. Esempio, in notazione musicale, di una coppia di stimoli estratti dalle condizioni Pattern (a), Metro (b) e Tempo (c). Nelle prime due condizioni è stato evidenziato in rosso l'elemento che differenzia i due stimoli.

Procedura. Ogni partecipante è stato sottoposto a 9 trial: due per ogni condizione più un trial di rest state che fungeva da baseline. La metà dei trial (escluso il trial di rest state) prevedeva due sequenze uguali, l'altra metà due sequenze diverse. Durante la sessione PET il soggetto era sdraiato, con gli

occhi chiusi ed eseguiva il compito di decisione uguale/diverso senza dare una risposta esplicita. Una volta finita la sessione PET, il partecipante ripeteva il compito, questa volta indicando in modo esplicito la risposta. Questa procedura ha permesso di rilevare che l'accuratezza media dei musicisti era uguale a quella dei non musicisti.

Acquisizione delle immagini. Le immagini funzionali PET sono state acquisite con un tomografo General Electric 4096 con campo di vista assiale di 10 cm, risoluzione pixel di 2.0 mm, che ha permesso di acquisire 15 scansioni assiali con una distanza inter-sezione, dal punto centrale di una sezione assiale a quella successiva, di 6.5 mm. Il flusso cerebrale regionale (rCBF) è stato misurato mediante acqua marcata con O^{15} (emivita di 123 secondi), somministrata per via endovenosa attraverso un bolo di 8-10 ml di soluzione salina contenente 60 mCi di tracciante. Dopo la somministrazione del bolo, si è eseguita una prima scansione della durata di 30 secondi al fine di permettere al tomografo la corretta detezione del tracciante. Durante questo periodo il soggetto eseguiva uno dei compiti sperimentali. Immediatamente dopo è stata acquisita una scansione di 60 secondi durante la quale il soggetto, sdraiato e ad occhi chiusi, eseguiva i compiti sperimentali. Un intervallo di 10 minuti separava una scansione dalla successiva, al fine di permettere un completo decadimento dell'isotopo radioattivo usato come tracciante e un ritorno a un livello di resting state del rCBF nelle aree corticali precedentemente attivate dal compito sperimentale. I dati ottenuti dal tomografo sono stati ricostruiti usando un filtro di Hann, ottenendo così immagini con una risoluzione spaziale di circa 7 mm.

Le immagini morfologiche di risonanza magnetica nucleare (RMI) sono state acquisite con uno scanner Elscint 1.9 T Prestige. Questa macchina è stata usata con una formula di acquisizione delle immagini 3D Gradient Recalled Acquisitions in the Steady State (3D GRASS), con un repetition time di 33 ms, un echo time di 12 ms e un flip angle di 60° . Le immagini ottenute avevano una dimensione di 256x192x192 pixel con una risoluzione spaziale di 1mm.

Analisi delle immagini. L'analisi delle immagini ottenute è stata eseguita con FSL 4.1.2 (FMRIB Software Library, Oxford University). Prima delle analisi di gruppo, il data set di attivazione funzionale di ogni singolo partecipante è stato sottoposto a intensity normalization e coregistrato alle rispettive immagini strutturali ad alta risoluzione. Quanto ottenuto è stato poi coregistrato in un spazio stereotassico standard (MNI) usando un metodo di ottimizzazione a 12 parametri (Jenkinson e coll., 2002). Successivamente, i dati sono stati sottoposti a Smooth mediante un filtro Gaussiano di 8 mm, inoltre i segnali relativi a strutture non cerebrali nelle immagini strutturali ad alta definizione sono stati rimossi usando il software Brain Extraction Tool (BET; Smith, 2002). Le analisi statistiche sono state condotte usando il software FEAT (fMRI Expert Analysis Tool; Woolrich e coll., 2001).

Nelle analisi dell'attivazione comune alle tre condizioni specificamente legate all'analisi del ritmo (Pattern, Metro e Tempo) abbiamo usato un livello di significatività clusterwise (corretto) di $P < 0,05$ ($Z > 2.3$) (Worsley et al 1992). Nell'analisi di ogni compito (Pattern, Metro, Tempo e Melodia) contro la condizione Rest a livello di gruppo (tutti i 10 partecipanti), abbiamo usato un livello di significatività clusterwise (corretto) di $P < 0,05$ ($Z > 2.3$); nell'analisi di ogni singola condizione ritmica (Pattern, Metro e Tempo) meno una della altre due condizioni (10 soggetti) abbiamo usato un livello di significatività voxelwise (non corretto) di $P < 0,01$; nelle comparazioni tra gruppi abbiamo usato un livello di significatività voxelwise (non corretto) di $P < 0,01$.

7.3 Risultati

Attivazione media di gruppo per le condizioni Pattern, Metro e Tempo (tutti i 10 partecipanti)

L'attivazione media rilevata per l'intero gruppo di partecipanti durante la prestazione ai tre compiti che più intimamente riguardano il ritmo musicale (Metro, Tempo e Pattern), mostra un pattern composito (vedi figura 7.1 sotto e Tabella 7.1 in Appendice). Emerge una chiara attività nel giro frontale mediale di destra (BA 8, 9), nel giro frontale medio di destra (BA 6, 8, 10), nel giro frontale inferiore destro (BA 45, 9), nell'insula di sinistra (BA 13), nel giro del cingolo anteriore

bilateralmente (BA 24, 32), nella corteccia motoria primaria bilateralmente (BA 4), nel giro temporale superiore sinistro (BA 22, 42), nel giro temporale superiore destro (BA 13), nel giro postcentrale destro (BA 40), nel giro sopramarginale bilateralmente (BA 40), nel precuneo di destra (BA 7) e nella zona crus I della porzione posteriore destra del cervelletto.

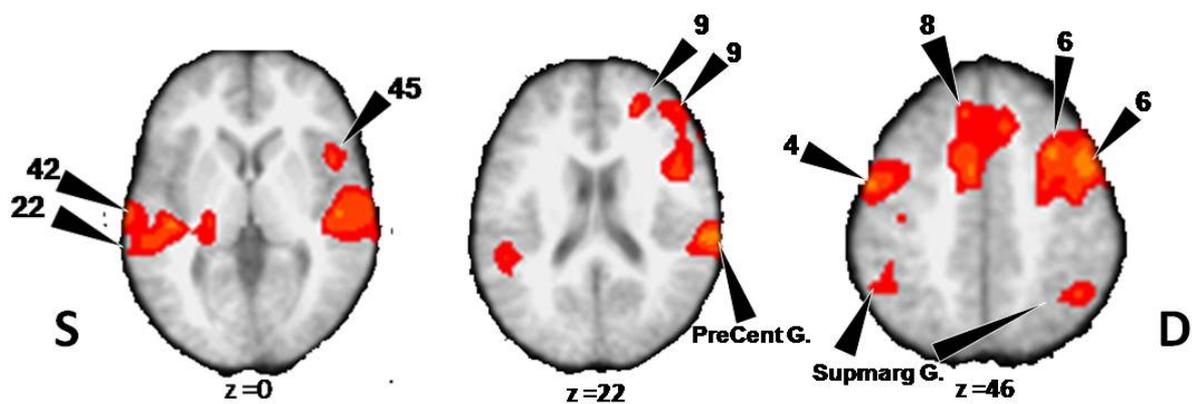


Figura 7.1. Regioni di attivazione comuni alle tre condizioni Pattern, Metro e Tempo (tutti i soggetti).

Attivazioni per la condizione Pattern (tutti i 10 partecipanti)

Pattern > Rest

In un'analisi riguardante l'attivazione comune a tutti i soggetti emersa durante la condizione Pattern, rispetto alla condizione Rest (vedi tabella 7.2 in Appendice), emerge un'attivazione significativa del giro temporale medio dell'emisfero destro (BA 22), del giro temporale superiore destro (BA 22, 42, 41), e del giro temporale trasverso destro (BA 42).

Pattern > Pattern-Metro-Tempo

Per la stessa condizione da un confronto con l'attivazione comune emersa nelle tre condizioni Pattern, Metro e Tempo (vedi figura 7.2 sotto e tabella 7.3 in Appendice), emerge un'attivazione a livello del giro del cingolo anteriore bilateralmente (BA 25, 32), del giro frontale medio sinistro (BA 6), dell'amigdala sinistra, del giro paraippocampale destro (BA 30), e del cervelletto in

corrispondenza delle zone crus I dell'emisfero sinistro, lobulo VI dell'emisfero destro e lobulo VI nell'area del verme.

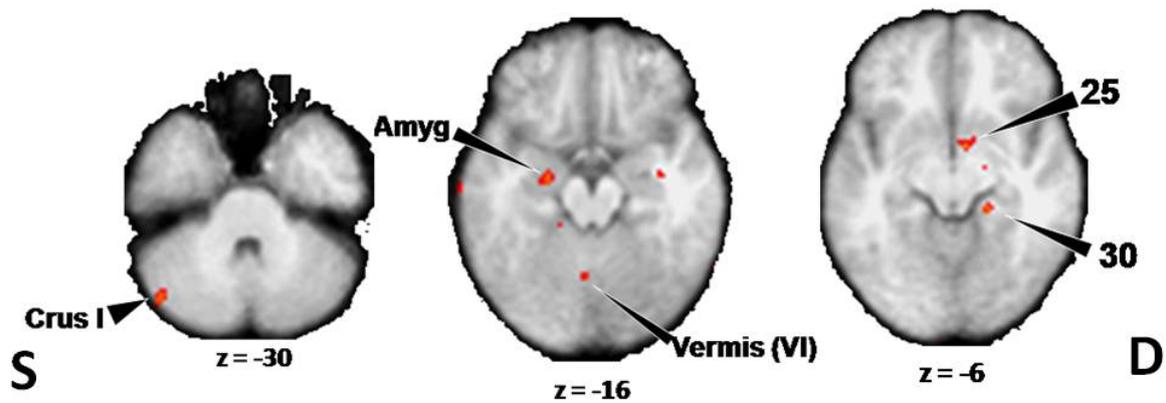


Figura 7.2. Regioni di attivazione specifiche per la condizione Pattern (tutti i soggetti).

Pattern > Tempo

In una analisi di confronto più selettiva riguardante la condizione Pattern per tutti i 10 partecipanti, confrontata con l'attività emersa per la condizione Tempo, emerge un'attivazione significativa nella corteccia pre-frontale a livello del giro frontale mediale bilateralmente (BA 10, 9, 8), del giro frontale superiore bilateralmente (BA 8, 10), del giro frontale medio destro (BA 10) e del giro frontale inferiore destro (BA 45). È inoltre emersa un'attivazione del giro del cingolo anteriore bilateralmente (BA 24, 32), del giro temporale mediale sinistro (BA 21), del giro temporale superiore destro (BA 22), del giro temporale inferiore destro (BA 20), del giro fusiforme destro (BA 20), e dell'emisfero cerebellare sinistro a livello del lobulo V.

Pattern > Metro

In un'analisi di confronto selettivo riguardante la condizione Pattern per tutti i soggetti, confrontata con la condizione Metro, emerge un'attivazione a livello della corteccia frontale mediale sinistra (BA 9, 10), frontale media bilaterale (BA 8, 6), frontale superiore sinistra (BA 10), della corteccia del

cingolo sinistra, dei giri temporali mediale e inferiore sinistri (BA 20, 21), del nucleo caudato bilaterale (testa e coda) e del claustrò destro.

Attivazioni per la condizione Metro (tutti i 10 partecipanti)

Metro > Rest

In un'analisi riguardante l'attivazione comune a tutti i soggetti emersa durante la condizione Metro, rispetto alla condizione Rest (vedi tabella 7.4 in Appendice), emerge un'attivazione significativa a livello del giro frontale inferiore destro (BA 44, 9), del giro precentrale destro (BA 6, 44) e del giro frontale medio destro (BA 46).

Metro > Pattern-Metro-Tempo

Per la stessa condizione da un confronto con l'attivazione comune emersa nelle tre condizioni Pattern, Metro e Tempo (vedi figura 7.3 sotto e tabella 7.5 in Appendice), emerge un'attivazione del giro frontale inferiore sinistro (BA 47), della corteccia prefrontale bilaterale (BA 10), del giro precentrale sinistro (BA 6), del giro frontale superiore destro (BA 9), dell'insula sinistra, del giro temporale inferiore destro (BA 20), del giro fusiforme bilaterale (BA 37), del cuneo e del giro occipitale medio sinistri (BA 18, 19), del claustrò destro, del globo pallido destro e del cervelletto posteriore destro a livello delle zone crus I e lobulo VI.

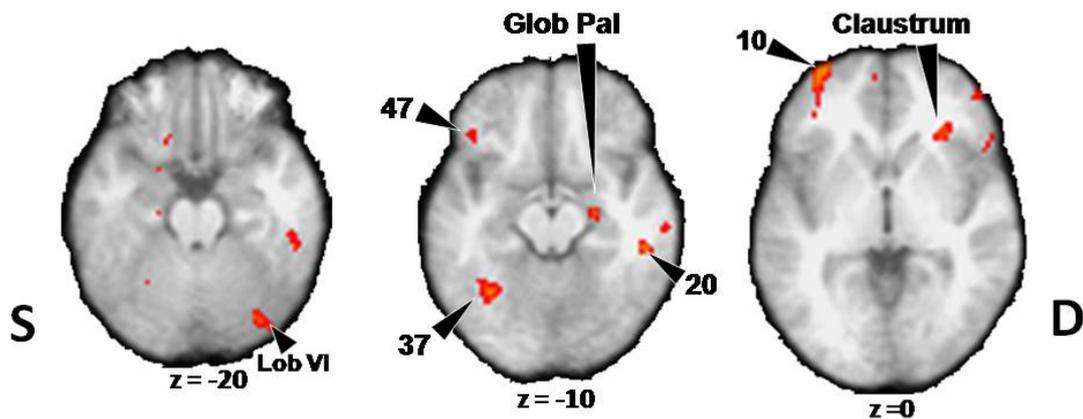


Figura 7.3. Regioni di attivazione specifiche per la condizione Metro (tutti i soggetti).

Metro > Tempo

In un'analisi di confronto selettivo riguardante la condizione Metro per tutti i soggetti, confrontata con la condizione Tempo, emerge un'attivazione a livello del giro frontale medio sinistro (BA 10), della corteccia frontale mediale/superiore sinistra (BA 9/10), del giro frontale inferiore sinistro (BA 44), del giro frontale medio destro (BA 10, 46), del giro frontale inferiore destro (BA 46, 47), della corteccia del cingolo anteriore sinistro (BA 32), dell'uncus sinistro (BA 34), del giro temporale inferiore destro (BA 20), del giro temporale medio destro (BA 21, 20), del giro fusiforme destro (BA 20) e del nucleo caudato sinistro (coda).

Metro > Pattern

In un'analisi di confronto selettivo riguardante la condizione Metro per tutti i soggetti, confrontata con la condizione Pattern, emerge un'attivazione a livello del giro frontale inferiore destro (BA 9, 44), del giro frontale medio destro (BA 46, 9), dell'insula destra, della corteccia del cingolo anteriore sinistra e posteriore destra, del giro temporale superiore sinistro (BA 22), del giro temporale medio sinistro (BA 39), e della corteccia occipitale a livello del cuneo e dei giri occipitali medi (BA 18, 19, 37).

Attivazioni per la condizione Tempo (tutti i 10 partecipanti)

Tempo > Rest

In un'analisi riguardante l'attivazione comune a tutti i soggetti emersa durante la condizione Tempo, rispetto alla condizione Rest (vedi tabella 7.6 in Appendice), emerge un'attivazione significativa a livello del giro frontale pre-centrale destro (BA 6, 8), dell'insula destra, del giro temporale superiore destro (BA 22, 42) e della corteccia parietale inferiore destra (incluso il giro sopramarginale).

Tempo > Pattern-Metro-Tempo

Per la stessa condizione da un confronto con l'attivazione comune emersa nelle tre condizioni Pattern, Metro e Tempo (vedi figura 7.4 sotto e tabella 7.7 in Appendice), emerge un'attivazione del giro frontale precentrale/medio bilaterale (BA 6), del giro del cingolo posteriore sinistro (BA 23, 31) e anteriore sinistro (BA 24), del giro temporale superiore destro (BA 22), del giro post-centrale sinistro (BA 2), del precuneo destro, del lobulo parietale superiore destro (BA 7) e dell'amigdala sinistra.

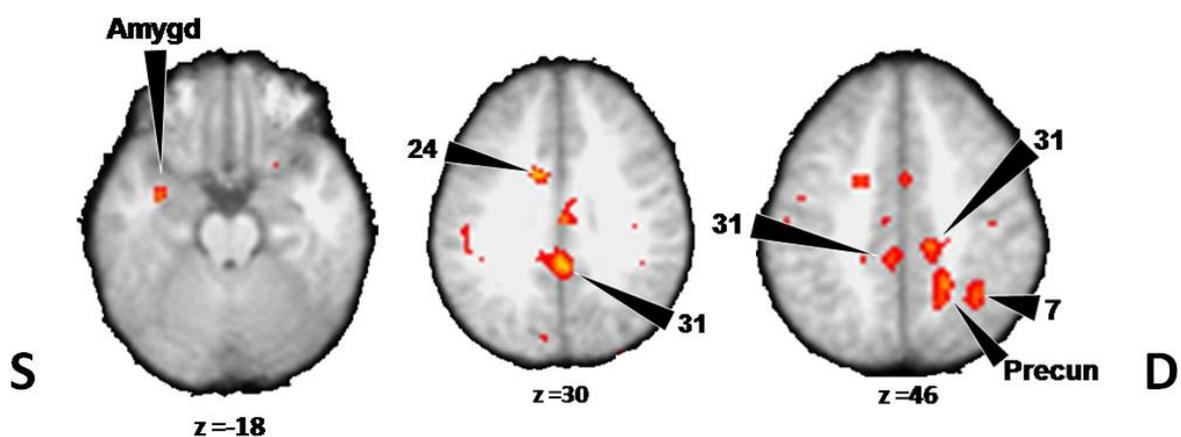


Figura 7.4. Regioni di attivazione specifiche per la condizione Tempo (tutti i soggetti).

Tempo > Metro

In un'analisi di confronto selettivo riguardante la condizione Tempo per tutti i soggetti, confrontata con la condizione Metro, emerge un'attivazione a livello del giro frontale superiore sinistro (BA 8, 9), del giro frontale medio/superiore bilaterale (BA 6, 8), del giro del cingolo posteriore destro (BA 31), della corteccia uditiva primaria sinistra (BA 42), del giro temporale superiore destro (BA 22) e del nucleo caudato sinistro (coda).

Tempo > Pattern

In un'analisi di confronto selettivo riguardante la condizione Tempo per tutti i soggetti, confrontata con la condizione Pattern, emerge un'attivazione a livello del giro frontale inferiore destro (BA 9, 44), del giro del cingolo sinistro (BA 31) e del giro temporale superiore sinistro (BA 22).

Confronti tra Musicisti e Non-musicisti per le condizioni Pattern, Metro e Tempo

Pattern-Metro-Tempo Musicisti > Pattern-Metro-Tempo Non-musicisti

L'attività media comune alle condizioni Pattern-Metro-Tempo per i Musicisti, rispetto a quella dei Non-musicisti (vedi figura 7.5 sotto e tabella 7.8 in Appendice), mostra attivazioni a livello del giro frontale medio destro (BA 8), del giro frontale mediale sinistro (BA 25), del giro frontale mediale destro (BA 10), del giro frontale inferiore destro (BA 47, 13), del giro del cingolo anteriore bilaterale (BA 32), del giro paraippocampale sinistro (BA 28), del giro temporale superiore/medio bilaterale (BA 38), del giro temporale inferiore/medio sinistro (BA 20, 21), del giro fusiforme sinistro (BA 37, 20), della corteccia occipitale bilaterale (BA 19 e, meno ampiamente, BA 18, 17) e del claustrum destro.

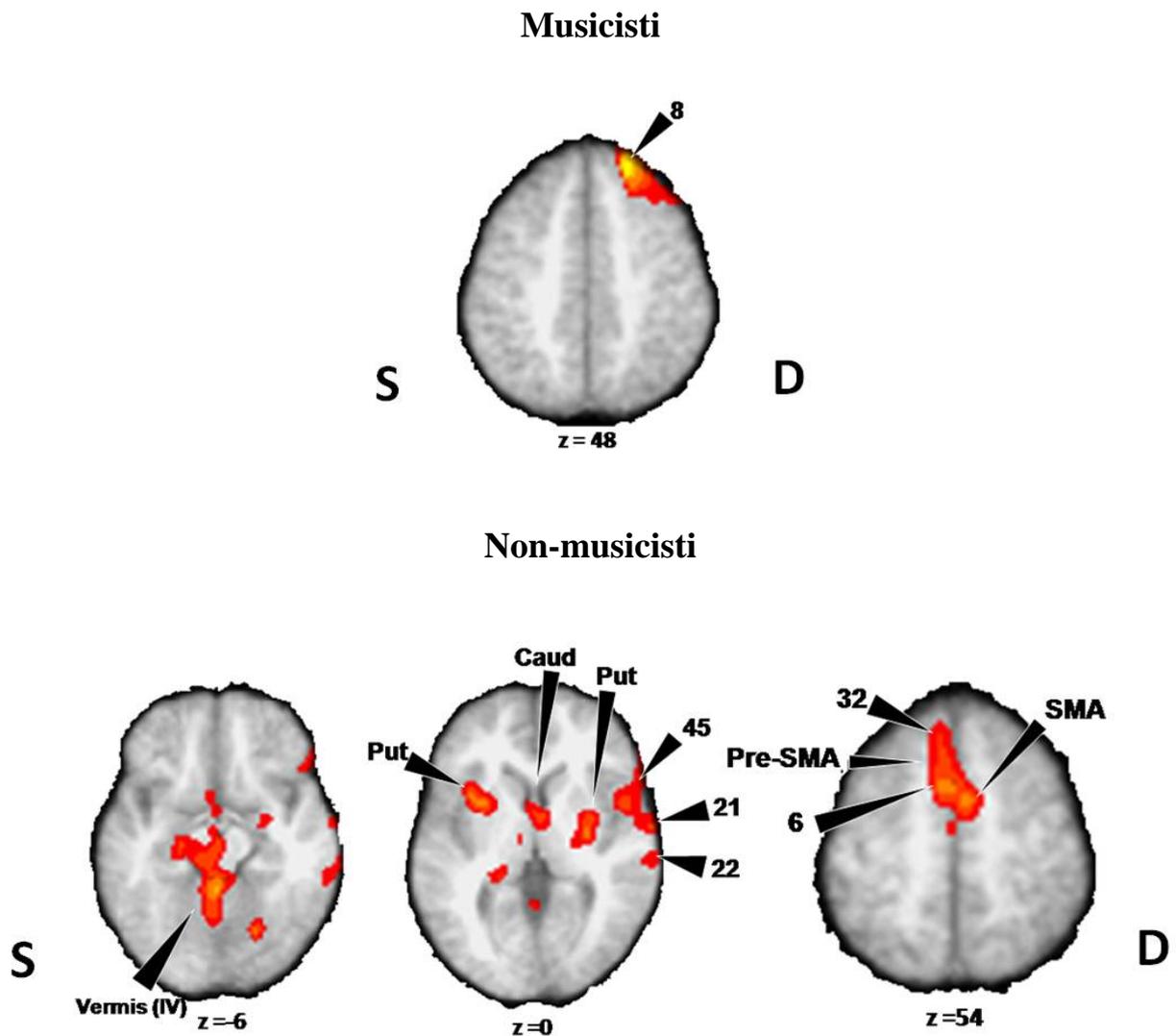


Figura 7.5. Regioni di attivazione comuni alle tre condizioni Pattern, Metro e Tempo nei Musicisti (sopra) e nei Non-musicisti (sotto).

Pattern-Metro-Tempo Non-musicisti > Pattern-Metro-Tempo Musicisti

L'attività media comune alle condizioni Pattern-Metro-Tempo per i Non-musicisti, rispetto a quella dei Musicisti (vedi figura 7.5 sopra e tabella 7.9 in Appendice), mostra attivazioni a livello della corteccia frontale mediale sinistra (BA 32), dell'area supplementare motoria bilaterale (BA 6), del giro frontale inferiore destro (BA 45), del lobulo paracentrale sinistro (BA 6), dell'insula destra, del giro temporale medio/superiore destro (BA 22, 21), del precuneo sinistro, del cervelletto a livello del verme (lobuli IV, VI, X) e dell'emisfero destro (lobulo VI), del putamen bilaterale e del nucleo caudato sinistro (testa).

Pattern Musicisti > Pattern Non-musicisti

Nella condizione Pattern (vedi figura 7.6 sotto e tabella 7.10 in Appendice) i Musicisti attivano selettivamente il giro frontale superiore destro (BA 8), il giro frontale inferiore destro (BA 13), il giro pre-centrale destro (BA 6), l'insula sinistra, il giro del cingolo anteriore sinistro e posteriore destro (BA 31), il cervelletto sinistro nella zona lobulo VI nella zona del verme (lobulo IX).

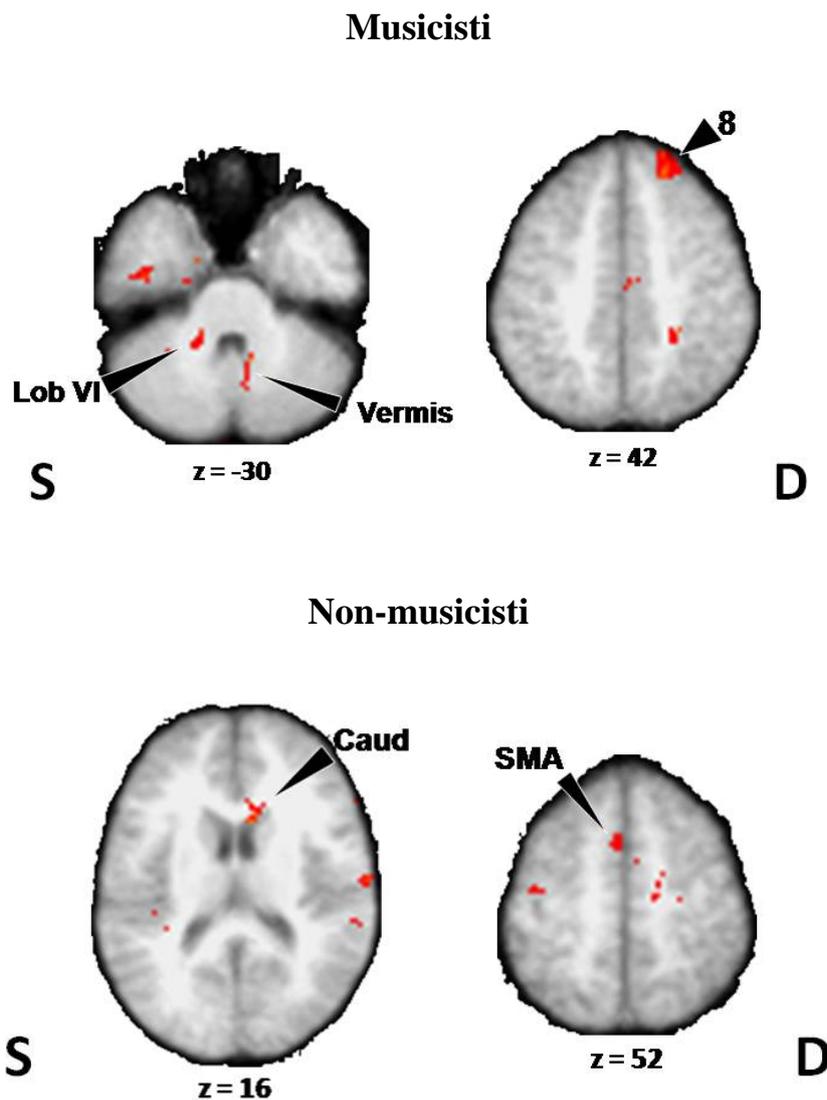


Figura 7.6. Regioni di attivazione specifiche per la condizione Pattern nei Musicisti (sopra) e nei Non-musicisti (sotto).

Pattern Non-musicisti > Pattern Musicisti

Nella condizione Pattern (vedi figura 7.6 sopra e tabella 7.11 in Appendice) i Non-musicisti presentano un'attivazione selettiva a livello dell'area supplementare motoria sinistra (BA 6), del giro

pre-centrale sinistro, del giro frontale superiore destro (BA 9), del giro post-centrale destro (BA 43), del giro del cingolo posteriore sinistro (BA 29), del giro temporale medio sinistro (BA 21), del giro temporale trasverso sinistro (BA 41), del nucleo caudato destro (corpo) e del cervelletto nelle zone del verme (lobulo VI), del lobulo VI destro e crus I destro.

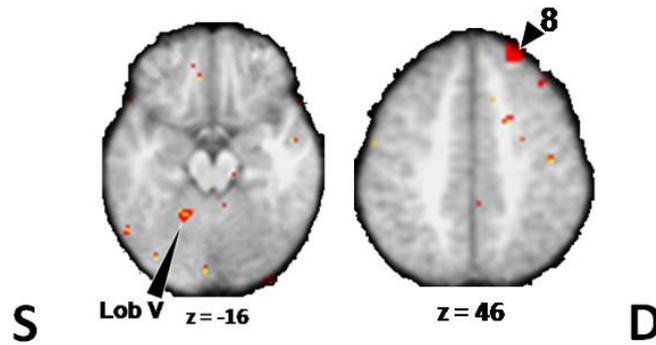
Metro Musicisti > Metro Non-musicisti

Nella condizione Metro (vedi figura 7.7 sotto e tabella 7.12 in Appendice) i Musicisti presentano una selettiva attivazione a livello del giro frontale superiore destro (BA 8), dell'insula sinistra, del giro temporale superiore sinistro (BA 22) e del cervelletto sinistro a livello della zona del lobulo V.

Metro Non-musicisti > Metro Musicisti

Nella condizione Metro (vedi figura 7.7 sotto e tabella 7.13 in Appendice) i Non-musicisti presentano un'attivazione a livello del giro frontale medio sinistro (BA 6), del giro frontale mediale destro (BA 6), del lobulo paracentrale sinistro (BA 6), dell'insula destra, del lobulo parietale inferiore destro (BA 40), del giro temporale superiore sinistro (BA 22), del giro temporale medio destro (BA 21), del nucleo lenticolare sinistro, del nucleo caudato destro (corpo) e del cervelletto nella zona del verme (lobulo X) e del lobulo VI sinistro.

Musicisti



Non-musicisti

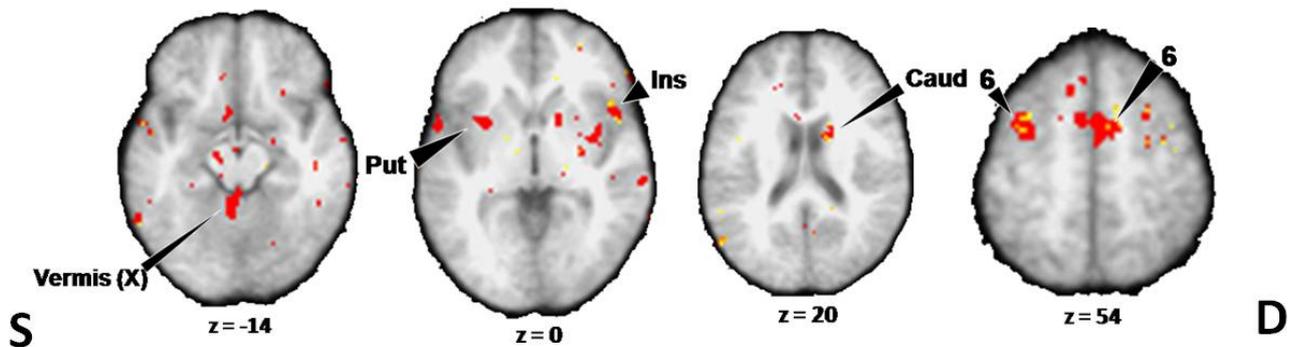


Figura 7.7. Regioni di attivazione specifiche per la condizione Metro nei Musicisti (sopra) e nei Non-musicisti (sotto).

Tempo Musicisti > Tempo Non-musicisti

La condizione Tempo (vedi figura 7.8 sotto e tabella 7.14 in Appendice) determina nei Musicisti una selettiva attivazione a livello del giro frontale superiore bilaterale (BA 8, 10), dell'insula sinistra, dei giri temporale superiore, medio e inferiore sinistri (rispettivamente BA 38, 37 e 20), del giro fusiforme sinistro (BA 37) e destro (BA 19), del lobulo parietale inferiore sinistro (BA 40) e del nucleo caudato destro (coda).

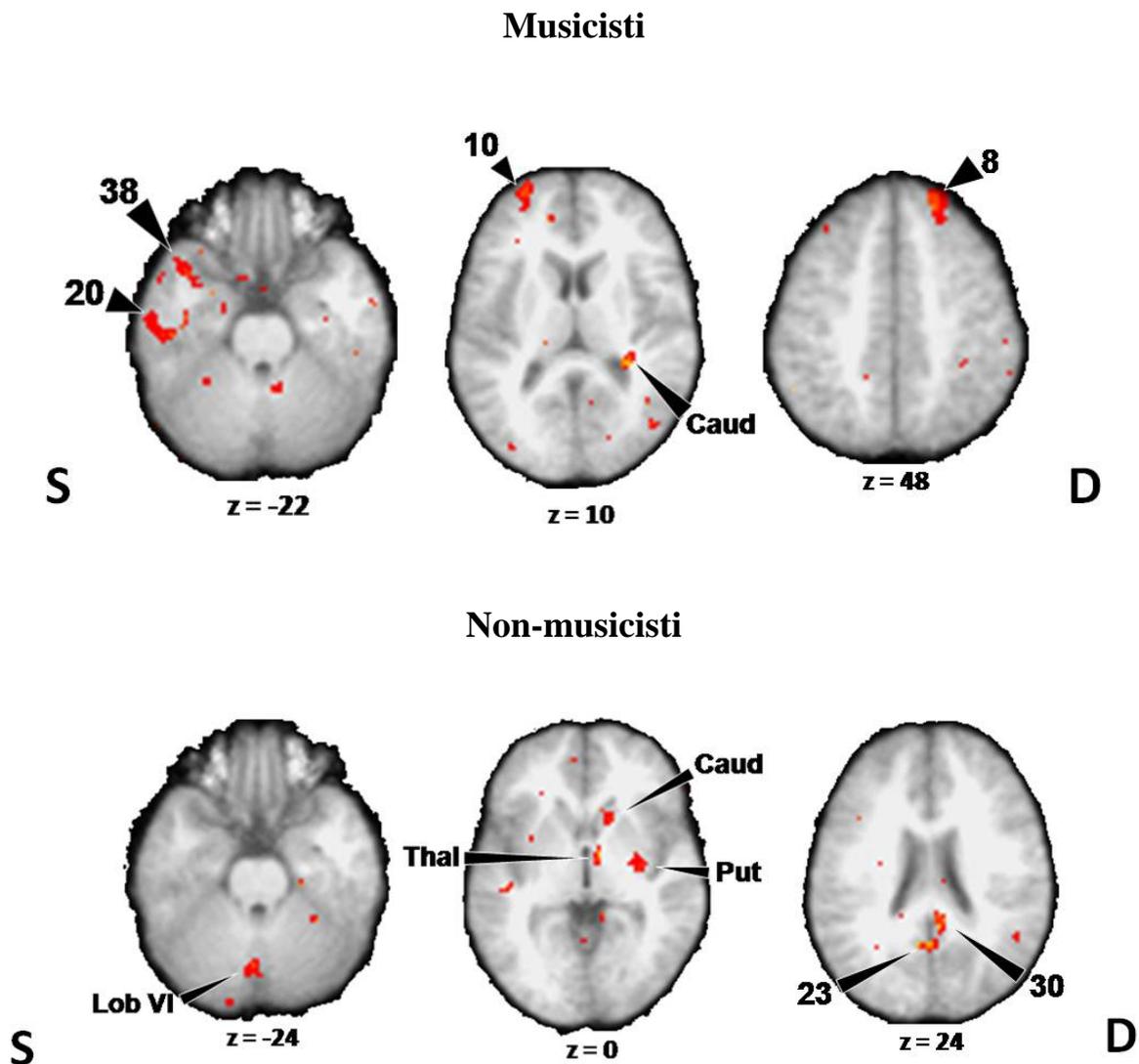


Figura 7.8. Regioni di attivazione specifiche per la condizione Tempo nei Musicisti (sopra) e nei Non-musicisti (sotto).

Tempo Non-musicisti > Tempo Musicisti

Nella condizione Tempo (vedi figura 7.8 sopra e tabella 7.15 in Appendice) i Non-musicisti presentano un'attivazione selettiva a livello della corteccia frontale mediale sinistra (BA 6), del giro frontale superiore destro (BA 8), del giro del cingolo posteriore bilaterale (BA 23, 30), del claustrum sinistro, del nucleo caudato destro (testa), del talamo destro, del nucleo lenticolare destro e del cervelletto a livello del verme (lobulo VI) e della zona del lobulo VI destro.

Attivazioni per la condizione Melodia

Melodia > Rest (tutti i 10 partecipanti)

In un'analisi riguardante la condizione Melodia, confrontata con la condizione Rest (vedi tabella 7.16 in Appendice), per tutti i partecipanti è emersa un'attivazione a livello dell'insula destra (BA 13), del giro temporale superiore destro (BA 42), del giro post-centrale destro (BA 40), del claustrum destro, e del cervelletto nelle zone crus I, lobulo VI e V nell'emisfero destro.

Musicisti > Non-musicisti

Nella condizione Melodia i Musicisti, rispetto ai Non-musicisti (vedi figura 7.9 sotto e tabella 7.17 in Appendice), mostrano un'attivazione a livello del giro frontale superiore bilaterale (BA 10), della corteccia frontale mediale destra (BA 9), del giro frontale inferiore sinistro (BA 45), del giro paraippocampale sinistro (BA 28), del precuneo sinistro (BA 7) e del nucleo ventro-postero-laterale del talamo sinistro.

Non-musicisti > Musicisti

Nella condizione Melodia i Non-musicisti, rispetto ai Musicisti (vedi figura 7.9 sotto e tabella 7.18 in Appendice), mostravano un'attivazione a livello del giro frontale inferiore destro (BA 13), del giro temporale superiore bilaterale (BA 22), del cuneo sinistro (BA 19), del precuneo sinistro (BA 7) e del cervelletto nella zona del verme anteriore (lobulo III) e del lobulo VI sinistro.

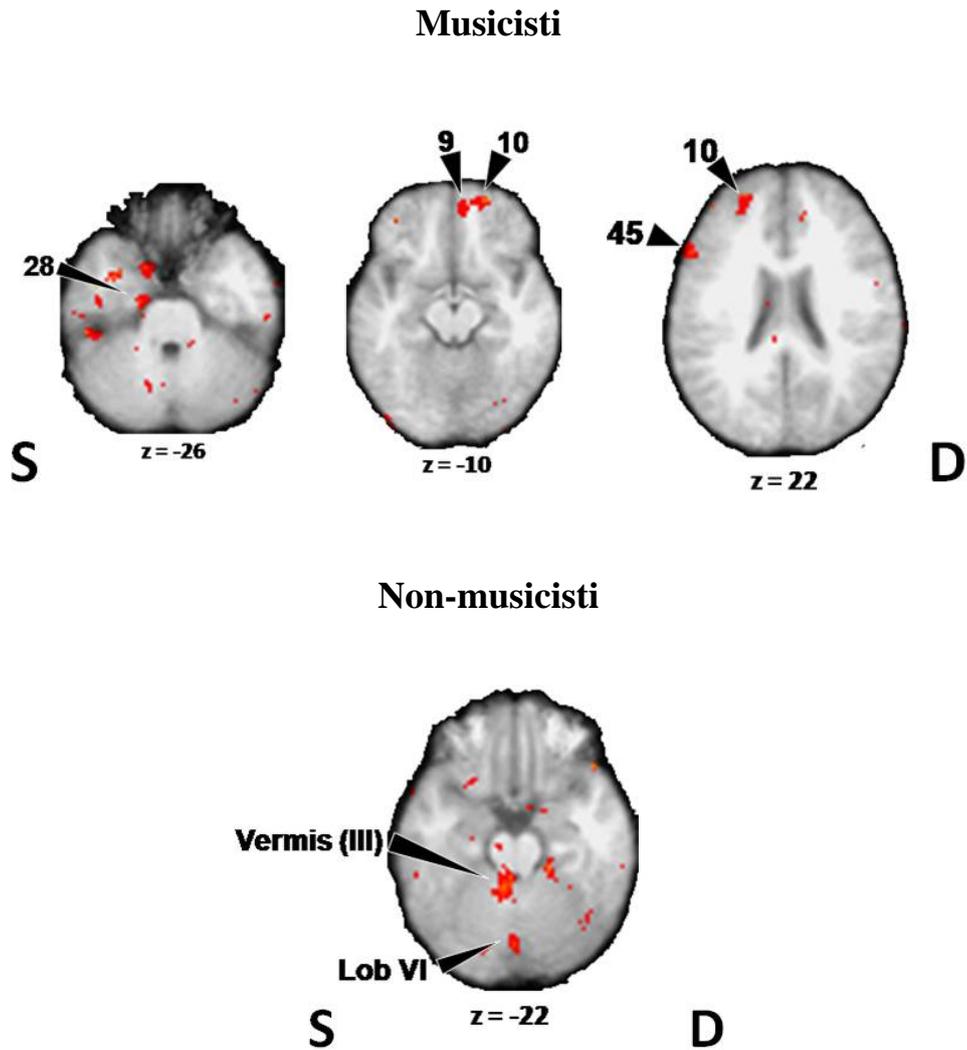


Figura 7.9. Regioni di attivazione specifiche per la condizione Melodia nei Musicisti (sopra) e nei Non-musicisti (sotto).

7.4 Discussione

Meccanismi comuni per l'elaborazione delle componenti Pattern, Metro e Tempo

L'analisi delle componenti relative al Pattern ritmico, al Metro e al Tempo comporta alcuni processi di elaborazione comuni quali: l'analisi sensoriale dei suoni; l'estrazione della struttura accentuativa e la sua rappresentazione in termini uditivi, visivi o motori (o mediante una combinazione di queste modalità); il mantenimento della precedente rappresentazione nella memoria di lavoro; la comparazione delle caratteristiche della prima e della seconda sequenza di suoni ascoltati durante il

compito per valutare la presenza di possibili differenze; operazioni associate alle funzioni esecutive necessarie per portare a termine il compito sperimentale; risposte emotive alle caratteristiche strutturali degli stimoli usati. L'attivazione comune ai tre compiti, principalmente distribuita nelle porzioni destre della corteccia frontale, nelle aree pre-frontali, nel giro del cingolo, nel lobo parietale, nel lobo temporale e nel cervelletto sembra riflettere questi processi di elaborazione.

Le attivazioni rilevate a livello della corteccia uditiva primaria e secondaria (BA 42, 22) sono verosimilmente correlabili all'analisi sensoriale precoce. Un'attivazione simile è stata rilevata in un gruppo di musicisti e non-musicisti durante un compito di ascolto passivo di semplici pattern ritmici eseguiti alla batteria (Limb e coll., 2006). L'attivazione emersa a livello del giro frontale medio bilaterale (BA 8) potrebbe rispecchiare un processo cognitivo legato al confronto delle diverse caratteristiche degli stimoli, in particolare al mantenimento delle diverse rappresentazioni coinvolte in questo tipo di compito. Tale interpretazione è suggerita dal fatto che un'attivazione simile è emersa in due studi PET in cui il compito dei partecipanti era quello di eseguire, come nel presente studio, una discriminazione percettiva tra coppie di sequenze musicali (Platel e coll., 1997; Parsons e coll., in preparazione). L'attivazione emersa a livello dei giri frontale medio, mediale e inferiore (BA 9), non è stata rilevata in altri studi sull'elaborazione del ritmo. In studi con altri tipi di stimoli l'attivazione di quest'area è stata associata alla memoria di lavoro (Ramnani e Owen, 2004).

Ulteriori attivazioni sono emerse a livello del polo frontale destro (BA 10) un'area associata alle funzioni esecutive e in particolare al mantenimento, durante un compito, dell'obiettivo finale e dei vari sotto-obiettivi (Ramnani e Owen, 2004; Koechlin e coll., 1999; van den Heuvel e coll., 2003), capacità che potrebbe essere coinvolta, nel nostro studio, con il mettere in relazione le componenti relative al Pattern ritmico con la struttura metrica globale dei vari stimoli usati. Infatti, un'attivazione simile è stata ottenuta in altri studi fMRI che hanno indagato l'elaborazione del ritmo tanto con compiti percettivi quanto con compiti di tapping. Il primo è uno studio in cui un gruppo di pianisti doveva leggere ed eseguire delle sequenze ritmiche (Bengtsson e Ullen, 2006), il secondo prevedeva

che un gruppo di non-musicisti imitasse, premendo un tasto, un pattern ritmico precedentemente ascoltato (Sakai e coll., 1999) e il terzo che un gruppo di non-musicisti ascoltasse passivamente pattern ritmici (Bengtsson e coll., 2009). L'attivazione a livello della corteccia frontale inferiore destra (BA 45) potrebbe essere correlata alla rappresentazione della struttura delle sequenze ritmiche usate in questo studio. Un'attivazione simile è stata infatti riscontrata in compiti di ascolto passivo, da parte di musicisti e non-musicisti, di semplici pattern ritmici suonati da una batteria (Limb e coll., 2006) e in un altro studio in cui un gruppo di pianisti dovevano eseguire alla tastiera dei pattern ritmici che leggevano in notazione musicale (Bengtsson e Ullen, 2006).

I risultati del presente studio mostrano un'attivazione a livello della corteccia motoria primaria (BA 4) sebbene il compito non prevedesse alcuna risposta motoria. Questo risultato è in linea con quanto emerso in uno studio fMRI di Bengtsson e colleghi (2009) in cui un gruppo di non-musicisti doveva ascoltare passivamente brevi sequenze ritmiche. Tanto il nostro cluster di attivazione quanto quello emerso nello studio citato sono molto vicini a una regione della corteccia motoria primaria associata a compiti di produzione verbale o di canto (Fox e coll., 2001; Brown e coll., 2004) e ciò suggerisce che durante il compito i soggetti abbiano usato una strategia di sub-vocalizzazione. Abbiamo inoltre rilevato un'attivazione a livello della corteccia del cingolo anteriore bilateralmente. L'attivazione di questa area è stata associata alla detezione di errori in compiti cognitivamente complessi (Carter e coll., 1998; Brown e Braver, 2005), operazione verosimilmente coinvolta nel compito usato nel nostro studio, che prevedeva la detezione di eventuali differenze in coppie di sequenze ritmiche.

L'attivazione emersa a livello della corteccia parietale, e in particolare nel giro sovramarginale bilaterale (BA 40), nel giro post-centrale (BA 40) e nel precuneo destro (BA 7), suggerisce un ruolo di queste aree in compiti legati all'elaborazione del ritmo. Un'attivazione simile è emersa in uno studio che prevedeva l'ascolto passivo di sequenze ritmiche da parte di musicisti e non-musicisti (Limb e coll., 2006). Questo dato è inoltre congruente con i risultati ottenuti in uno studio di Di Pietro e colleghi (2004) in cui un paziente con lesioni del lobulo parietale inferiore sinistro

presentava deficit di elaborazione e riproduzione di pattern ritmici pur conservando la capacità di elaborazione della componente metrica. Un'attivazione bilaterale della corteccia parietale inferiore è stata inoltre rilevata in uno studio fMRI in cui un gruppo di non-musicisti doveva eseguire un compito di tapping, reale o immaginato, in sincronia con uno stimolo uditivo isocronico (Oullier e coll., 2005). Questi dati suggeriscono che la corteccia parietale inferiore sia coinvolta nella rappresentazione della struttura ritmica. Inoltre, il lobulo parietale superiore sembra essere coinvolto in compiti di working memory (Koenigs e coll., 2009).

È emersa inoltre una attivazione dell'insula destra, un'area associata a compiti che coinvolgono rappresentazioni somatosensoriali (Critchley e coll., 2004; Craig, 2009; Gu e coll., 2010). Questo dato è congruente con quanto emerso in uno studio PET di discriminazione percettiva di coppie di sequenze ritmiche (Platel e coll., 1997), da uno studio fMRI in cui un gruppo di non-musicisti doveva eseguire un compito di tapping su semplici sequenze poliritmiche (Ullén e coll., 2003) e da uno studio MEG in cui a un gruppo di musicisti veniva richiesto di sovrapporre implicitamente strutture metriche diverse (Valzer o Marcia) su una sequenza isocronica di click (Fujioka e coll., 2010). Infine un'evidenza convergente riguardo il coinvolgimento dell'insula in compiti di percezione del ritmo proviene da uno studio lesionale da cui risulta che pazienti con lesioni in questa area presentano deficit selettivi nella percezione del ritmo e della durata di stimoli uditivi (Bamiou e coll., 2006).

È emersa infine un'attivazione del cervelletto a livello della zona crus I destra. Un'attivazione simile è emersa in una meta-analisi riguardante studi che comportavano l'elaborazione di stimoli uditivi (Petacchi e coll., 2005) suggerendo un ruolo di questa area nell'elaborazione cognitiva di stimoli uditivi.

Meccanismi distinti per l'elaborazione delle componenti Pattern, Metro e Tempo

Riguardo l'attivazione associata all'analisi selettiva delle diverse sottocomponenti del ritmo, quanto emerso suggerisce la presenza di diversi pattern. In termini generali, l'elaborazione della componente

metrica, rispetto alle componenti Pattern e Tempo, coinvolge aree associate a funzioni di livello cognitivo superiore, astratto e multi-modale (visivo-uditivo). L'elaborazione del Pattern attiva un set di aree correlate all'analisi di informazioni uditive ed emotive. Infine, l'elaborazione del Tempo è correlata a una maggiore attivazione di aree coinvolte in aspetti somatosensoriali, pre-motori ed emotivi. Questo quadro suggerisce che le informazioni metriche di uno stimolo musicale vengono inizialmente elaborate nelle aree temporali deputate all'elaborazione uditiva ma successivamente inviate per un'analisi più completa ad altri sottosistemi, mentre le informazioni relative al Pattern continuano ad essere elaborate e livello delle aree uditive e, successivamente, in aree deputate all'elaborazione delle emozioni. Ciò sembra essere in linea con l'idea che la componente Pattern compori l'analisi di aspetti locali dello stimolo ritmico, mentre le componenti Tempo e, in particolare, Metro siano proprietà percettive emergenti di natura più astratta (o globale). Inoltre, sebbene la componente Metro sembrerebbe quella più associata al movimento, rispetto alla componente Tempo, la sua analisi non recluta una porzione rilevante di aree motorie, anche se coinvolge una varietà di aree somatosensoriali.

Nella seguente sezione esaminiamo in modo specifico le attivazioni emerse nelle tre condizioni Pattern, Metro e Tempo, valutando la congruenza dei nostri risultati con quelli emersi in altri studi della letteratura sullo stesso argomento.

Pattern. Dal punto di vista cognitivo, l'elaborazione di questa componente richiede la rappresentazione della durata delle singole note e degli intervalli temporali che dividono un suono dall'altro nonché la costruzione di una struttura generale che legghi i singoli elementi precedenti in una struttura organica. I nostri risultati suggeriscono che tali funzioni siano selettivamente associate all'attività corticale temporale, dell'area pre-supplementare motoria (pre-SMA), del giro del cingolo, del sistema limbico e del cervelletto.

Specificamente, l'attività rilevata nel giro temporale medio e superiore potrebbe essere associata alla rappresentazione in formato uditivo della successione ritmica degli elementi ascoltati. Similmente,

l'attivazione rilevata nella porzione crus I del cervelletto sinistro e nel lobulo VI del cervelletto destro è verosimilmente associata alla rappresentazione di informazioni temporali uditive e funzionalmente correlabile all'attività rilevata a livello del lobo temporale destro (Petacchi e coll., 2005). L'associazione tra pattern ritmico e salienza emotiva potrebbe essere alla base dell'attivazione osservata a livello dell'amigdala e del para-ippocampo, dato congruente con altri studi di brain imaging che hanno usato compiti di ascolto passivo da parte di musicisti e non musicisti (Blood e Zatorre, 2001; Blood, Zatorre, Bermudez, e Evans, 1999; Ball e coll., 2007; Brown, Martinez, e Parsons, 2006; Koelsch e coll., 2006; Brown, Martinez e Parsons, 2004; Koelsch e coll., 2005). Similmente, l'attivazione di rappresentazioni legate alla relazione tra componenti emotive e cognitive dello stimolo ritmico può essere alla base del coinvolgimento della corteccia del cingolo anteriore. Infine, l'attivazione della pre-SMA potrebbe essere correlata al coinvolgimento di rappresentazioni motorie astratte dello stimolo (Bengtsson e coll., 2009; Limb e coll., 2006)

Metro. L'elaborazione di questa componente prevede la rappresentazione di cicli sequenziali e ripetitivi di accenti forti e deboli. I risultati che abbiamo ottenuto mostrano che in questa condizione si osserva un'attivazione della corteccia pre-frontale (BA 9/10), frontale dorso-laterale e precentrale, temporale inferiore, occipitale (BA 18/19), fusiforme e dell'insula. Erano inoltre presenti attivazioni a livello sottocorticale (claustrum e globo pallido) e del cervelletto. Dal punto di vista funzionale, l'attività computazionale richiesta in questa condizione appare consistente con il coinvolgimento di aree frontali e pre-frontali della corteccia cerebrale. In particolare, la corteccia pre-frontale (BA 9/10) è stata associata ad attività esecutive di controllo coinvolte nel mantenere attivo un obiettivo generale durante il raggiungimento di sotto-tappe di un compito complesso (Ramnani e Owen, 2004). L'attivazione di queste aree è congruente con quanto emerso da un precedente studio che ha indagato l'elaborazione uditiva di stimoli costituiti da pattern ritmici in un compito di ascolto passivo (Bengtsson e coll., 2009). In merito all'attivazione delle aree frontali dorso-laterali, esse sono associate a compiti di working memory (BA 46), organizzazione sequenziale (BA 44) e rappresentazione di strutture complesse (BA 47), tutti aspetti coinvolti in un compito riguardante

l'elaborazione della componente metrica di un ritmo, come confermato recentemente anche da uno studio MEG in cui ai partecipanti veniva richiesto di sovrapporre mentalmente due diversi tipi di metro (Valzer e Marcia) a uno stimolo acustico isocronico costituito da una sequenza di click (Fujioka e coll., 2010). Un'interpretazione simile può essere invocata per l'attivazione osservata a livello dell'area pre-motoria (BA 6), associata ad aspetti legati al rehearsal durante compiti che coinvolgono la working memory, indipendentemente dalle caratteristiche dello stimolo coinvolto nel compito (Cabeza e Nyberg, 2000)

Ulteriori attivazioni nell'analisi della componente metrica sono emerse nella corteccia visiva (BA 18/19 e cuneo). Non ci sono altri studi che riportano questo tipo di attivazione durante l'elaborazione del Metro musicale. Dal momento che i partecipanti eseguivano il compito ad occhi chiusi, tale riscontro potrebbe suggerire l'utilizzo di una strategia visiva da parte dei soggetti, tuttavia ulteriori studi saranno necessari per valutare questa ipotesi.

L'attivazione del claustrum non è di semplice interpretazione, seppur già osservata in altri studi sull'elaborazione uditiva del metro musicale (Fujioka e coll., 2010). Il ruolo del claustrum in ambito cognitivo non è ancora compreso (Crick e Koch, 2005), tuttavia i risultati di un recente studio suggeriscono che questa struttura possa essere coinvolta nella detezione di cambiamenti rilevanti in una stimolazione sensoriale (Remedios e coll., 2010), aspetto forse coinvolto in modo più ampio per l'elaborazione del metro rispetto agli altri compiti sperimentali usati in questo studio.

L'attivazione a livello del globo pallido appare congruente con un recente studio che mostra il coinvolgimento di questa struttura nella percezione di pattern ritmici a struttura metrica semplice o complessa (Grahn e Brett, 2009). Infine, l'attivazione a livello del cervelletto (lobulo IV e crus I) è simile a quella ottenuta in uno studio di Chen e colleghi (2008) che sfruttava un compito di ascolto passivo di pattern ritmici.

Tempo. Nel presente studio, l'elaborazione della componente temporale richiede la detezione di cambiamenti di velocità in una breve melodia. Questo tipo di elaborazione sembra congruente con il reclutamento di meccanismi coinvolti nell'elaborazione di informazioni di carattere somato-sensoriale, motorio ed emotivo. Specificamente, l'attività emersa nel giro post-centrale e nell'insula è associata a processi di rappresentazione del corpo o somato-sensoriali (Craig, 2009; Gu e coll., 2010; Critchley e coll., 2004), probabilmente coinvolti nella valutazione delle variazioni di velocità (risposte di movimento alla musica). Similmente, processi di associazione tra aspetti percettivi e aspetti motori sono stati rilevati in aree parietali inferiori vicine a quelle rilevate in questo studio (Chong e coll., 2008). Inoltre, l'influenza della velocità sulle risposte emotive può essere alla base delle attivazioni rilevate a livello dell'amigdala e del pre-cuneo. Il compito di monitorare i cambiamenti di tempo in una sequenza ha probabilmente attivato processi di attesa rispetto a un evento a loro volta associati all'attivazione del giro del cingolo anteriore e posteriore e del giro frontale medio (BA 8) (Volz e coll., 2005; Stern e coll., 2010). Inoltre, il monitoraggio di sequenze di stimoli è stato associato all'attivazione di aree frontali medio-laterali e al giro pre-centrale (Tanaka e coll., 2005). Infine, l'elaborazione del Tempo attiva aree della corteccia temporale superiore destra diverse rispetto a quelle associate all'elaborazione di Metro e Pattern, suggerendo un distinto processo computazionale associato all'elaborazione della velocità di eventi uditivi.

Meccanismi specifici per l'elaborazione della Melodia

Eseguire il compito nella condizione Melodia richiede probabilmente di elaborare informazioni sull'altezza del suono, sull'andamento del contorno melodico, sui rapporti tonali fra i suoni, sulla struttura armonica. Tale compito può inoltre comportare una risposta emotiva al materiale proposto. Questi processi sono probabilmente espressi nelle attivazioni riscontrate a livello parietale destro, temporale superiore destro, dell'insula destra, del claustrale destro e del cervelletto posteriore destro. L'attivazione a livello dell'insula riflette probabilmente il coinvolgimento di un processo emotivo (Griffiths e coll., 2004; Blood e Zatorre, 2001). Il ruolo del claustrale, come abbiamo accennato più

sopra, non è del tutto chiaro (Crick e Koch, 2005), tuttavia i risultati di un recente studio suggeriscono che questa struttura possa essere coinvolta nella detezione di cambiamenti rilevanti in una stimolazione sensoriale (Remedios e coll., 2010). L'attivazione a livello della corteccia parietale inferiore destra, emersa in uno studio PET in cui un gruppo di musicisti doveva rilevare errori di natura melodica (Parsons e coll., in preparazione), è verosimilmente associata alla attivazione di una rappresentazione spaziale dell'altezza del suono e del contorno melodico. L'attivazione a livello della corteccia uditiva primaria (BA 42) è simile a quella emersa in altri studi riguardanti l'elaborazione di una melodia (Peretz e Zatorre, 2005; Parsons e coll., 2009) ed è probabilmente associata all'elaborazione delle informazioni sull'altezza del suono. Infine, l'attivazione a livello cerebellare (crus I, lobulo VI destro e lobulo V destro), simile a quella ottenuta in uno studio fMRI con un compito di giudizio uguale-diverso su coppie di melodie e in una meta-analisi indagante il ruolo del cervelletto nell'elaborazione uditiva (rispettivamente Gaab e coll., 2003; Petacchi e coll., 2005), suggerisce un ruolo di questa struttura nell'elaborazione delle informazioni sull'altezza del suono.

Meccanismi specifici per Musicisti e Non-musicisti

I risultati emersi da questo studio permettono infine di delineare alcuni interessanti trend riguardo l'elaborazione delle diverse componenti del ritmo da parte di musicisti e non musicisti, mostrando che alcune basi neurali sembrano essere comuni mentre altre appaiono distinte nei due gruppi. Globalmente i Musicisti sembrano reclutare rappresentazioni di alto livello situate nei lobi temporale, frontale e occipitale, mentre i Non-musicisti reclutano maggiormente aree senso-motorie, sottocorticali e cerebellari. Questi trend sono consistenti con i risultati ottenuti in un precedente studio fMRI in cui partecipanti musicisti e non-musicisti ascoltavano passivamente semplici pattern ritmici prodotti da una batteria (Limb e coll., 2006). In quest'ultimo studio, nel quale non erano separate le diverse componenti ritmiche, emergeva un'attivazione a livello delle cortecce pre-motoria, occipitale, del pre-cuneo, del globo pallido e del putamen per i Non-musicisti e a livello della corteccia prefrontale (BA 10, 9, 8) e dell'opercolo frontale (BA 44, 45, 47) per i Musicisti. Nel

nostro studio questa tendenza emerge anche nel compito di discriminazione di melodie, per il quale i Non-musicisti presentano una prevalente attivazione a livello cerebellare mentre i Musicisti a livello prefrontale (BA 9/10), frontale inferiore (BA 45 sinistra) e paraippocampale. Rispetto all'attivazione cerebellare emersa nella condizione Melodia per i Non-musicisti, il cluster nella zona del lobulo VI sinistro è vicino a quello emerso in una meta-analisi riguardante diversi studi di elaborazione di stimoli uditivi da parte di non-musicisti (Petacchi e coll., 2005). Il cluster emerso a livello della zona del verme (lobulo III) è molto vicino a quello emerso in uno studio PET sui movimenti di danza per la condizione che confrontava la danza in presenza di musica con l'esecuzione degli stessi movimenti senza musica (Brown e coll., 2006). Il primo cluster sembra essere collegata a una funzione di analisi uditiva in sé, mentre il secondo cluster appare associabile all'elaborazione della struttura di ritmi isocronici (che caratterizzavano gli stimoli della condizione Melodia) solo nei Non-musicisti. L'attivazione emersa nei Musicisti per questo compito appare riflettere l'uso di funzioni cognitive di livello superiore. L'attivazione della corteccia frontale inferiore sinistra (BA 45, area di Broca) è stata precedentemente osservata in compiti di improvvisazione melodica da parte di musicisti (Brown e coll., 2006) e in compiti di detezione di irregolarità armoniche in una sequenza di accordi (Koelsch e coll., 2005). L'attivazione della corteccia pre-frontale potrebbe essere associata a funzioni legate alla memoria di lavoro, all'attivazione di rappresentazioni di tipo astratto e al coinvolgimento di funzioni esecutive (Ramnani e Owen, 2004; Badre e D'Esposito, 2009; Christoff e coll., 2009; Rugg e Wilding, 2000; Velanova e coll., 2003). Inoltre, l'attivazione a livello paraippocampale sinistro può essere coinvolta nella detezione di differenze tra coppie di stimoli usati nel compito (ad es., Okuda e coll., 1998; Dolan e Fletcher, 1997; Fujii e coll., 1997; Knight, 1996).

Nei compiti di natura ritmica, il confronto diretto tra i due gruppi evidenzia nei Non-musicisti una prevalente attivazione delle aree temporali destre (giro temporale superiore e medio) e nei Musicisti una maggiore attivazione delle aree temporali sinistre (giro temporale superiore, medio e inferiore). Questa distinzione emisferica tra Musicisti e Non-musicisti durante compiti di natura ritmica,

richiama una serie di precedenti osservazioni che mostravano lo stesso pattern di lateralizzazione nell'elaborazione di stimoli musicali in cui le componenti melodiche, armoniche e ritmiche erano combinate tra loro (Bever e Chiarello, 1974). Inoltre, i nostri risultati sono congruenti con studi precedenti che hanno dimostrato come (i) non-musicisti che ascoltano passivamente pattern ritmici attivano solo la corteccia temporale superiore destra (Bengtsson e coll., 2009), (ii) musicisti che ascoltano passivamente semplici sequenze ritmiche eseguite alla batteria attivano prevalentemente aree del giro temporale medio sinistro (Limb e coll., 2006).

7.5 Conclusioni

Nel presente studio è emerso che l'analisi selettiva di ogni sotto-componente del ritmo musicale (Pattern, Metro e Tempo) si associa a diversi pattern di attivazione neurale, suggerendo la presenza di circuiti di elaborazione diversi. In particolare, l'elaborazione del Metro sembra coinvolgere aree associate a funzioni di livello cognitivo superiore, astratto e multi-modale (visivo-uditivo), l'elaborazione del Pattern attiva un set di aree correlate all'analisi di informazioni uditive ed emotive mentre l'elaborazione del Tempo è correlata a una maggiore attivazione di aree coinvolte in aspetti somatosensoriali, pre-motori ed emotivi. Inoltre, globalmente i musicisti sembrano reclutare rappresentazioni di alto livello situate nei lobi temporale, frontale e occipitale, mentre i non-musicisti reclutano maggiormente aree senso-motorie, sottocorticali e cerebellari. Quest'ultimo dato, ossia la modificazione nell'elaborazione neurale come conseguenza dell'expertise, è stato rilevato anche per altri tipi di competenze quali il gioco degli scacchi (Chase e Simon, 1973; Campitelli e coll., 2007) e il giudizio estetico (Kirk e coll., 2009).

I risultati ottenuti permettono di affinare, dal punto di vista interpretativo, quanto emerso in buona parte degli studi di brain imaging funzionale precedentemente condotti sullo stesso argomento. In questi studi si è generalmente trattato il ritmo musicale come un'unica entità e non come un aspetto cui contribuiscono diversi elementi (Pattern, Metro e Tempo). Questo ha verosimilmente impedito di

definire in termini precisi il sistema neuroanatomico che supporta l'elaborazione di questa componente della musica.

Concludendo, quanto emerso può costituire un nuovo punto di partenza per un'indagine più approfondita e completa delle basi neurali dell'elaborazione del ritmo musicale.

Bibliografia

- Aglioti, S. M. e Pazzaglia, M. (2010). Representing actions through their sound. *Experimental Brain Research*, DOI 10.1007/s00221-010-2344-x.
- Albert, M. L., Sparks, R. W. e Helm, N. A. (1973). Melodic intonation therapy for aphasia. *Archives of Neurology*, 29 (2), 130-131.
- Alcock, K. J., Passingham, R. E., Watkins, A. J., & Vargha-Khadem, F. (2000). Pitch and timing abilities in inherited speech and language impairment. *Brain and Language*, 75, 34–46.
- Ayotte, J., Peretz, I., & Hyde, K. L. (2002). Congenital amusia: A group study of adults afflicted with a music-specific disorder. *Brain*, 125, 238-251.
- Badre, D. e D'Esposito, M. (2009). Is the rostro-caudal axis of the frontal lobe hierarchical? *Nature Review Neuroscience*, 10, 659–669
- Ball, T., Rahm, B., Eickhoff, S. B., Schulze-Bonhage, A., Speck, O. e Mutschler, I. (2007). Response properties of human amygdala subregions: Evidence based on functional MRI combined with probabilistic anatomical maps. *PLoS ONE* 2, e307.doi:10.1371/journal.pone.0000307.
- Bamiou, D. E., Musiek, F. E., Stow, I., Stevens, J., Cipolotti, L., Brown, M. M., e Luxon, L. M. (2006). Auditory temporal processing deficits in patients with insular stroke. *Neurology*, 67, 614–619.
- Bangert, M., Peschel, T., Schlaug, G., Rotte, M., Drescher, D., Hinrichs, H., Heinze, H. J. e Altenmüller, E. (2006). Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: evidence from fMRI conjunction. *Neuroimage*, 30, 917–926.
- Baruch, C., e Drake, C. (1997). Tempo discrimination in infants. *Infant Behavior and Development*, 20, 573–577.
- Baumann, S., Koeneke, S., Schmidt, C. F., Meyer, M., Lutz, K. e Jancke, L. (2007). A network for audio-motor coordination in skilled pianists and non-musicians. *Brain Research*, 1161, 65–78.

- Bengtsson, S. L., Ullén, F., Ehrsson, H. H., Hashimoto, T., Kito, T., Naito, E., Forssberg, H. e Sadato, N. (2009). Listening to rhythms activates motor and pre-motor cortex. *Cortex*, 45, 62–71.
- Bengtsson, S.L. e Ullén, F. (2006). Dissociation between melodic and rhythmic processing during piano performance from musical scores. *Neuroimage*, 30, 272 – 284.
- Bever, T. G. e Chiarello, R., (1974). Cerebral dominance in musicians and nonmusicians. *Science*, 185, 537–539.
- Birkhead, T. (2008). *The Wisdom of Birds*. London: Bloomsbury.
- Blood, A. J. e Zatorre, R. J. (2001). Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *PNAS*, 98, 11818–11823.
- Blood, A. J., Zatorre, R. J., Bermudes, P., e Evans, A. C. (1999). Emotional responses to pleasant and unpleasant music correlate with activity in paralimbic brain regions. *Nature Neuroscience*, 2, 382-387.
- Brown, J. W. e Braver, T. S. (2005). Learned predictions of error likelihood in the anterior cingulate cortex. *Science*, 307, 1118–1121.
- Brown, S. e Martinez, M. J. (2007). Activation of premotor vocal areas during musical discrimination. *Brain and Cognition*, 63, 59–69.
- Brown, S., Martinez, M. J., e Parsons, L. M. (2006). Music and language side by side in the brain: a PET study of the generation of melodies and sentences. *European Journal of Neuroscience*, 23, 2791–2803.
- Brown, S., Martinez, M.J. e Parsons, L.M. (2004). Passive music listening spontaneously engages limbic and paralimbic systems. *NeuroReport*, 15, 2033-2037.
- Cabeza, R., e Nyberg, L. (2000). Imaging cognition: II. An empirical review of 275 PET and fMRI studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 1–47.

- Campitelli, G., Gobet, F., Head, K., Buckley, M., e Parker, A. (2007). Brain localization of memory chunks in chessplayers. *International Journal of neuroscience*, 117, 1641-1659.
- Carlson-Radvansky, L. A. e Irwin, D. E. (1993). Frames of reference in vision and language: Where is above? *Cognition*, 46, 223-244.
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., e Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280, 747–49.
- Chease W. G. e Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, 4, 55-81.
- Chen, J. L., Penhune, V. B. e Zatorre, R. J. (2008). Listening to musical rhythms recruits motor regions of the brain. *Cerebral Cortex*, 18, 2844 –2854.
- Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008). Listening to Musical Rhythms Recruits Motor Regions of the Brain. *Cerebral Cortex*, 18, 2844-2854.
- Cho, Y. S. e Proctor, R. W. (2003). Stimulus and response representations underlying orthogonal stimulus-response compatibility effects. *Psychonomic Bulletin and Review*, 10, 45-73.
- Chong, J. J. T., Cunnington, R., Williams, M. A., Kanwisher, N. e Mattingley, J. B. (2008). fMRI Adaptation Reveals Mirror Neurons in Human Inferior Parietal Cortex. *Current Biology*, 18, 1576–1580.
- Chouinard, P.A. e Paus, T. (2006). The primary motor and premotor areas of the human cerebral cortex. *Neuroscientist*, 12, 1–10.
- Chow, M. L., Brambati, S. M., Gorno-Tempini, M. L., Miller, B. L., e Johnson, J. K. (2010). Sound naming in neurodegenerative disease. *Brain and Cognition*, 72 (3), 423-429.
- Christoff, K., Keramatian, K., Gordon, A. M., Smith, R., e Madler, B. (2009). Prefrontal organization of cognitive control according to levels of abstraction. *Brain Research*, 1286, 94–105.
- Clarke, E.F. (1987). Levels of structure in the organization of musical time. *Contemporary Music Review*, 2, 211–239.

- Cohen Kadosh, R., Brodsky, W., Levin, M. & Henik, A. (2008). Mental representation: What can pitch tell us about the distance effect? *Cortex*, 44, 470-477.
- Coltheart, M. (1999). Modularity and cognition. *Trends in Cognitive Science*, 3(3), 115–120.
- Coltheart, M. (2001). Assumptions and Methods in Cognitive Neuropsychology. In: B. Rapp (Ed.), *The Handbook of Cognitive Neuropsychology*. Philadelphia, PA: Psychology Press.
- Coltheart, M., Inglis, L., Cupples, L., Michie, P., Bates, A. e Budd, B. (1998). A semantic subsystem specific to the storage of information about visual attributes of animate and inanimate objects. *Neurocase*, 4, 353-370.
- Conard, N. J., Malina, M., & Münzel, S. C. (2009). New flutes document the earliest musical tradition in southwestern Germany. *Nature*, 460, 737-740.
- Coull, J. T. (2009). Neural substrates of mounting temporal expectation. *PLoS Biology*, 7, e1000166. doi: 10.1371/journal.pbio.1000166.
- Coull, J. T. e Nobre, A. C., (2008). Dissociating explicit timing from temporal expectation with fMRI. *Current Opinion in Neurobiology*, 18, 137–144.
- Craig, A. D. (2009). How do you feel–now? The anterior insula and human awareness. *Nature Review Neuroscience*, 10, 59 –70.
- Craighero, L., Metta, G., Sandini, G., e Fadiga, L. (2007). The mirror-neurons system: data and models. *Progress in Brain Research*, 164, 39-59.
- Crick, F.e Koch, C. (2005). What is the Function of the Claustrum. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London B*, 360, 1271–1279.
- Critchley, H. D., Wiens, S., Rotshtein, P., Ohman, A., e Dolan, R. J. (2004). Neural systems supporting interoceptive awareness. *Nature Neuroscience*, 7, 189 –195.
- Cross, I. (2000). Music, cognition, culture, and evolution. In: N. L. Wallin, B. Merkers, & S. Brown (Eds.), *The Origins of Music*. Cambridge, MA: MIT Press.

- D'Ausilio, A., Altenmüller, E., Olivetti Belardinelli, M., e Lotze, M. (2006). Cross-modal plasticity of the motor cortex while listening to a rehearsed musical piece. *European Journal of Neuroscience*, 24, 955–958.
- D'Ausilio, A., Brunetti, R., Delogu, F., Santonico, C., e Belardinelli, M. O. (2010). How and when auditory action effects impair motor performance. *Experimental Brain Research*, 201, 323–330.
- D'Ausilio, A., Craighero, L., e Fadiga, L. (2010). The contribution of the frontal lobe to the perception of speech. *Journal of Neurolinguistics*, doi:10.1016/j.jneuroling.2010.02.003.
- D'Ausilio, A., Pulvermuller, F., Salmas, P., Bufalari, I., Begliomini, C., e Fadiga, L. (2009). The motor somatotopy of speech perception. *Current Biology*, 19, 381-385.
- Dehaene, S. (2009). *Reading in the brain*. New York: Penguin Viking.
- Dehaene, S., Bossini, S. e Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122, 371-396.
- Della Bella, S., Giguère, J.-F., e Peretz, I. (2007) Singing proficiency in the general population. *Journal of Acoustical Society of America*, 121, 1182-1189.
- Denora, T. (2001). Aesthetic agency and musical practice: New directions in the sociology of music and emotion. In: P. N. Juslin & J. A. Sloboda (Eds.), *Music and Emotion: Theory and Research*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Desain, P. e Honing, H. (2003). The formation of rhythmic categories and metric priming. *Perception*, 32, 341-365.
- Desain, P., e Windsor, L. (2000). *Rhythm: Perception and production*. Lisse, The Netherlands: Swets & Zeitlinger.
- Deutsch, D. (1986). A musical paradox. *Music Perception*, 3, 275-280.
- Deutsch, D. (1987). The tritone paradox: Effects of spectral variables. *Perception & Psychophysics*, 41, 563-575.

- Deutsch, D. (1991). The tritone paradox: An influence of language on music perception. *Music Perception*, 8, 335-347.
- Di Pietro, M., Laganaro, M., Leemann, B., e Schnider, A. (2004). Receptive amusia: temporal auditory processing deficit in a professional musician following a left temporo-parietal lesion. *Neuropsychologia*, 42, 868–877.
- Dolan, R. e Fletcher, P.C. (1997). Dissociating prefrontal and hippocampal function in episodic memory encoding. *Neurosciences Letters*, 388, 582–585.
- Drake, C. e Botte, M. C. (1993). Tempo sensitivity in auditory sequences: Evidence for a multiple-look model. *Perception and psychophysics*, 54, 277-286.
- Drayna, D., Manichaikul, A., de Lange, M., Snieder, H., & Spector, T. (2001). Genetic correlates of musical pitch recognition in humans. *Science*, 291, 1969-1972.
- Drost, U. C., Rieger, M., Brass, M., Gunter, T. C., & Prinz, W. (2005a). When hearing turns into playing: Movement induction by auditory stimuli in pianists. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 58, 1376 -1389.
- Drost, U. C., Rieger, M., Brass, M., Gunter, T.C., & Prinz, W. (2005b). Action-effect coupling in pianists. *Psychological Research* , 69, 233-241.
- Drost, U. C., Rieger, M., e Prinz, W. (2007). Instrument specificity in experienced musicians. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 60, 527–533.
- Elsner, B., e Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 229–240.
- Elsner, B., e Hommel, B. (2004). Contiguity and contingency in the acquisition of action effects. *Psychological Research*, 68, 138-154.
- Fadiga, L., Craighero, L., Buccino, G., e Rizzolatti, G. (2002). Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: a TMS study. *European Journal of Neuroscience*, 15, 399–402.

- Fias, W., Brysbaert, M., Geypens, F., & d'Ydewalle, G. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition*, 2, 95-110.
- Fodor, J. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge, MA: MIT press.
- Fox, T. P., Huang, A., Parsons, L. P., Xiong, J., Zamarippa, F., Rainey, L. e Lancaster, J. L. (2001) location-Probability Profiles for the Mouth Region of Human Primary Motor-Sensory Corex: Model and Validation. *Neuroimage*, 13, 196-209.
- Foxton, J. M., Nandy, R. K., e Griffiths, T. D. (2006). Rhythm deficits in 'tone deafness'. *Brain and Cognition* 62, 24–29.
- Fraisse, P. (1982). Rhythm and tempo. In D. Deutsch (Ed.), *The psychology of music*. San Diego, CA: Academic Press.
- Fujii, T., Okuda, J., Kawashima, R., Yamadori, A., Fukatsu, R., Suzuki, K., Ito, M., Goto, R. e Fukuda, H. (1997). Different roles of the left and right parahippocampal regions in verbal recognition: a PET study, *NeuroReport*, 8, 1113–1117.
- Fujioka, T., Zendel, B. R., e Ross, B. (2010). Endogenous Neuromagnetic Activity for Mental Hierarchy of Timing. *The Journal of Neuroscience*, 30, 3458–3466.
- Gaab, N., Gaser, C., Zaehle, T., Jancke, L., e Schlaug, G. (2003). Functional anatomy of pitch memory—an fMRI study with sparse temporal sampling. *Neuroimage*, 19, 1417–1426.
- Galati, G., Committeri, G., Spitoni, G., Aprile, T., Di Russo, F., Pitzalis, S., e Pizzamiglio, L. (2008). A selective representation of the meaning of actions in the auditory mirror system. *Neuroimage*, 40, 1274–1286.
- Gazzola, V., Aziz-Zadeh, L., Keysers, C. (2006). Empathy and the somatotopic auditory mirror system in humans. *Current Biology*, 16, 1824–1829.
- Gevers, W., Ratinckx, E., De Baene, W., & Fias, W. (2006). Further evidence that the SNARC effect is processed along a dual-route architecture: Evidence from the lateralized readiness potential. *Experimental Psychology*, 53, 58-68.

- Gibson, E. J. (1969). *Principles of perceptual learning and development*. Prentice- Hall.
- Godefroy, O., Leys, D., Furby, A., De Reuck, J., Daems, C., Rondepierre, P., Debachy, B., Deleume, J. F. e Desaulty, A. (1995). Psychoacoustical deficits related to bilateral subcortical hemorrhages. A case with apperceptive auditory agnosia. *Cortex*, 31, 149–159.
- Gordon, E. E. (1965). *Musical aptitude profile*. Boston: Houghton-Mifflin.
- Gould, S.J. e Vrba, C. (1982). Exaptation—a missing term in the science of form. *Paleobiology*, 8, 4-15.
- Grahn, J. A. e Brett, M. (2007). Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19, 893–906.
- Grahn, J. A. e Brett, M. (2009). Impairment of beat-based rhythm discrimination in Parkinson's disease. *Cortex*, 45, 54–61.
- Greenwald, A. G. (1970). Sensory feedback mechanisms in performance control: With special reference to the ideomotor mechanism. *Psychological Review*, 77, 73–99.
- Griffiths, T. D., Warren, J. D., Dean, J. L., e Howard, D. (2004). "When the feeling's gone": a selective loss of musical emotion. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 75, 344-345.
- Griffiths, T.D., Rees, A., Witton, C., Cross, P.M., Shakir, R. A. e Green, G. G. (1997). Spatial and temporal auditory processing deficits following right hemisphere infarction: a psychophysical study. *Brain*, 120, 785–794.
- Grube, M., Cooper, F.E., Chinnery, P.F., Griffiths, T.D. (in press). Dissociation of duration-based and beat-based auditory timing in cerebellar degeneration. *PNAS*.
- Gu, X., Liu, X, Guise, K. G., Naidich, T. P., Hof, P. R. e Fan, J. (2010). Functional Dissociation of the Frontoinsular and Anterior Cingulate Cortices in Empathy for Pain. *The Journal of Neuroscience*, 30, 3739–3744.
- Hallam, S., Cross, I., e Thaut, M. (2009). *Oxford Handbook of Music Psychology*. Oxford, UK: Oxford University Press.

- Hannon, E. E. e Trainor L. J. (2007). Music acquisition: effects of enculturation and formal training on development. *Trends in Cognitive Sciences*, 11, 466-472.
- Hannon, E.E. e Trehub, S.E. (2005). Metrical Categories in Infancy and Adulthood. *Psychological Science*, 16, 48-55.
- Harrington, D. L., Haaland, K. Y., e Knight, R. T. (1998). Cortical networks underlying mechanisms of time perception. *The journal of neuroscience*, 18, 1085-1095.
- Harrington, D. L., Lee, R. R., Boyd, L. A., Rapcsak, S. Z., e Knight, R. T. (2004a). Does the representation of time depend on the cerebellum: effect of cerebellar stroke. *Brain*, 127, 561–574.
- Harrington, D. L., Lee, R. R., Boyd, L. A., Rapcsak, S. Z., e Knight, R. T. (2004b). Reply to: Evaluating the role of the cerebellum in temporal processing: beware of the null hypothesis. *Brain*, e14, 127.
- Hasegawa, T., Matsuki, K. I., Ueno, T., Maeda, Y., Matsue, Y., Konishi, Y., e Sadato, N. (2004). Learned audio-visual cross-modal associations in observed piano playing activate the left planum temporale. An fMRI study. *Cognitive Brain Research*, 20, 510-518.
- Haslinger, B., Erhard, P., Altenmüller, E., Schroeder, D., Boecker, H., e Ceballos-Baumann, A. O. (2005). Transmodal sensorimotor networks during action observation in professional pianists. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17, 282-293.
- Haueisen, J., & Knosche, T. R. (2001). Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 786-792.
- Hickok, G. (2010). The role of mirror neurons in speech perception and action word semantics. *Language and Cognitive Processes*, 25 (6), 749-776.
- Hommel, B. (1994). Spontaneous decay of response code activation. *Psychological Research*, 56, 261–268.

- Hommel, B. (1996). The cognitive representation of action: Automatic integration of perceived action effects. *Psychological Research/Psychologische Forschung*, 59, 176-186.
- Hommel, B. (1997). Toward an action concept model of stimulus-response compatibility. In: *Theoretical issues in stimulus-response compatibility*, B. Hommel e W. Prinz (Eds). North-Holland.
- Hommel, B. (1998). Event files: Evidence for automatic integration of stimulus-response episodes. *Visual Cognition*, 5, 183–216.
- Hommel, B. (2009). Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychological Research*, 73, 512-526.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., e Prinz, W. (2001). The theory of event coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849–878.
- Huron, D. (2000). Is music an evolutionary adaptation? In: N. L. Wallin, B. Merkers, & S. Brown (Eds.), *The Origins of Music*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Ivry, R. B., Spencer, R. M., Zelaznik, H. N., e Diedrichsen, J. (2002). The cerebellum and event timing. *Annals of the New York Academy of Science*, 978, 302–317.
- James, W. (1890). *The Principles of psychology*. New York: Dover Publications.
- Jeannerod, M. (1999). To act or not to act: Perspectives on the representation of actions (The 25th Bartlett Lecture). *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 52, 1– 29.
- Jenkinson, M., Bannister, P. R., Brady, J. M. e Smith, S. M. (2002). Improved optimisation for the robust and accurate linear registration and motion correction of brain images. *NeuroImage*, 17, 825-841.
- Jones, M. R. (1976). Time, our lost dimension: Toward a new theory of perception, attention and memory. *Psychological Review*, 83, 323-355.
- Kàrolyi, O. (2000). *La grammatica della musica*. Torino: Einaudi.

- Keller, P.E. and Koch, I. (2006a). The planning and execution of short auditory sequences. *Psychonomic Bulletin & Review* 13 (4), 711-716.
- Keller, P. E., & Koch, I. (2006b). Exogenous and endogenous response priming with auditory stimuli. *Advances in Cognitive Psychology*, 2(4), 269-276.
- Keller, P.E. and Koch, I. (2008). Action planning in sequential skills: Relations to music performance', *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61 (2), 275-291.
- Kirk, U., Skov, M., Christensen, M. S., e Nygaard, N. (2009). Brain correlates of aesthetic expertise: A parametric fMRI study. *Brain and Cognition*, 69, 306–315.
- Knight, R.T. (1996). Contribution of human hippocampal region to novelty detection, *Neurosciences Letters*, 383, 256–259.
- Koechlin, E., Basso, G., Pietrini, P., Panzer, S., e Grafman, J. (1999). The role of the anterior prefrontal cortex in human cognition. *Nature*, 399, 148-151.
- Koelsch, S., Fritz, T., Schluze, K., Alsop, D., Schlaug, G. (2005). Adults and children processing music: an fMRI study. *Neuroimage*, 25, 1068–1076.
- Koelsch, S., Fritz, T., von Cramon, D. Y., Müller, K. e Friederici, A. D. (2006). Investigating emotion with music: an fMRI study. *Human Brain Mapping*, 27, 239–250.
- Koenigs, M., Barbey, A. K., Postle, B. R., e Grafman, J. (2009). Superior Parietal Cortex Is Critical for the Manipulation of Information in Working Memory. *The Journal of Neuroscience*, 29, 14980–14986.
- Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M.A., Fogassi, L., Gallese, V., e Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: Action representation in mirror neurons. *Science*, 297, 846–848.
- Kornblum, S., Hasbroucq, T., e Osman, A. (1990). Dimensional overlap: Cognitive basis of stimulus–response compatibility—A model and taxonomy. *Psychological Review*, 97, 253–270.

- Kornblum, S., Stevens, G. T., Whipple, A., e Requin, J. (1999). The effects of irrelevant stimuli I: The time course of stimulus–stimulus and stimulus–response consistency effects with Stroop-like stimuli, Simon-like tasks, and their factorial combinations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 688–714.
- Laignel-Lavastine, M., & Alajouanine, T. (1921). Un cas d’agnosie auditive. *Société de Neurologie*, 37, 194–198.
- Levitin, D. J. e Tirovolas, A. K. (2009). Current advances in the cognitive neuroscience of music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1156, 211–231.
- Levitin, D. J., e Menon, V. (2005). The neural locus of temporal structure and expectancies in music: Evidence from functional neuroimaging at 3 Tesla. *Music Perception*, 22, 563-575.
- Lewis, J. W., Brefczynski, J. A., Phinney, R. E., Janik, J. J., e DeYoe, E. A. (2005). Distinct cortical pathways for processing tool versus animal sounds. *Journal of Neuroscience*, 25, 5148–5158.
- Lewis, P. e Miall, R. (2003). Brain activation patterns during measurement of sub- and supra-second intervals. *Neuropsychologia*, 41, 1583-1592.
- Liberman, A. M., Cooper, F. S., Shankweiler, D. P. e Studdert-Kennedy, M. (1967). Perception of the speech code. *Psychological Review*, 74, 431–461.
- Lidji, P., Kolinsky, R., Lochy, A., e Morais, J. (2007). Spatial associations for musical stimuli: A piano in the head? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 33, 1189-1207.
- Liégeois-Chauvel, C., Peretz, I., Babai, M., Laguitton, V., e Chauvel, P. (1998). Contribution of different cortical areas in the temporal lobes to music processing. *Brain*, 121, 1853-1867.
- Liepmann, H. (1900). Das Krankheitsbild der Apraxie (Motorischen/Asymbolie). *Monatschrift für Psychiatrie und Neurologie*, 8, 15–44, 102–132.
- Limb, C. J., Kemeny, S., Ortgoza, E., Rouhani, S. e Braun, A. R. (2006). Left hemispheric lateralization of brain activity during passive rhythm perception in musicians. *The Anatomical Record Part A*, 288, 382–389.

- London, J. (2004). *Hearing in time: Psychological aspects of musical meter*. New York: Oxford.
- Longuet-Higgins, H. C. e Lee, C. S. (1982). The perception of musical rhythm. *Perception*, 11, 115-128.
- Lorch Jr., R. F., & Meyers, J. L. (1990). Regression analyses of repeated measures data in cognition research. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16, 149-157.
- Lotze, R. H. (1852). *Medicinische Psychologie oder die Physiologie der Seele*. Leipzig: Weidmann'sche Buchhandlung.
- Lu, C.-H., e Proctor, R. W. (1995). The influence of irrelevant location information on performance: A review of the Simon and spatial Stroop effect. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2, 174–207.
- Luria, A. R. (1966). *Higher cortical functions in man*. New York: Basic Books.
- Mapelli, D., Rusconi, E., & Umiltà, C. (2003). The SNARC effect: An instance of the Simon effect? *Cognition*, 88, B1-B10.
- Margulis, E.H., Mlsna, L.M., Uppunda, A.K., Parrish, T.B. e Wong, P.C. (2009). Selective neurophysiologic responses to music in instrumentalists with different listening biographies. *Human Brain Mapping* 30, 267–275.
- McDermott, J. e Hauser, M. (2005). The Origins of Music: Innateness, Uniqueness, and Evolution. *Music Perception*, 23, 29-59.
- Melcher, T., Weidema, M., Eenshuistra, R. M., Hommel, B., & Gruber, O. (2008). The neural substrate of the ideomotor principle: An event-related fMRI analysis. *NeuroImage*, 39, 1274-1288
- Mendez, M. (2001). Generalized auditory agnosia with spared music recognition in a lefthander. Analysis of a case with a right temporal stroke. *Cortex*, 37, 139–150.
- Metz-Lutz, M.N. & Dahl, E. (1984). Analysis of word comprehension in a case of pure word deafness. *Brain and Language*, 23, 13–25.

- Miller, G. (2000). Evolution of human music through sexual selection. In: N. L. Wallin, B. Merkers, & S. Brown (Eds.), *The Origins of Music*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Milner, A. D. e Goodale, M. A. (1995). *The visual brain in action*. Oxford University Press.
- Mithen, S. (2005). *The Singing Neanderthals: The Origins of Music, Language, Mind and Body*. London: Weidenfeld & Nicolson.
- Morley, I. (2003). *The Evolutionary Origins and Archaeology of Music: An Investigation into the Prehistory of Human Musical Capacities and Behaviours*. Ph.D dissertation, University of Cambridge.
- Morrongello, B.A., e Trehub, S.E. (1987). Age-related changes in auditory temporal perception. *Journal of Experimental Child Psychology*, 44, 413–426.
- Müsseler, J. e Hommel, B. (1997a). Blindness to response-compatible stimuli. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23 (3), 861–872.
- Müsseler, J. e Hommel, B. (1997b). Detecting and identifying response-compatible stimuli. *Psychonomic Bulletin and Review*, 4, 125–129.
- Mukamel, R., Ekstrom, A.D., Kaplan, J., Iacoboni, M., e Fried, I. (2010). Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions. *Current Biology*, 20, 750–756.
- Murray, M. M., Camen, C., Gonzalez Andino, S. L., Bovet, P., e Clarke, S. (2006). Rapid brain discrimination of sounds of objects. *Journal of Neuroscience*, 26, 1293–1302.
- Mutschler, I., Schulze-Bonhage, A., Glauche, V., Demandt, E., Speck O, et al (2007). A Rapid Sound-Action Association Effect in Human Insular Cortex. *PLoS ONE* 2(2): e259. doi:10.1371/journal.pone.0000259
- Nakata, T. e Trehub, S. E. (2004). Infants' responsiveness to maternal speech and singing. *Infant Behavior and Development*, 27, 455-464.
- Nettl, B. (1956). *Music in primitive culture*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

- Nettl, B. (2000). An ethnomusicologist contemplates universals in musical sound and musical culture. In: N. L. Wallin, B. Merkers, & S. Brown (Eds.), *The Origins of Music*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Nishimura, A. e Yokosawa, K. (2009). Effects of laterality and pitch height of an auditory accessory stimulus on horizontal response selection: The Simon effect and the SMARC effect. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16 , 666-670.
- Okuda J, Fujii T, Yamadori A, Kawashima R, Tsukiura T, Fukatsu R, Suzuki, K., Ito, M., e Fukuda, H. (1998). Participation of the prefrontal cortices in prospective memory: evidence from a PET study in humans. *Neuroscience Letters*, 253, 127–30.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97–113.
- Oullier, O., Jantzen, K.J., Steinberg, F.L., e Kelso, J.A.S. (2005). Neural Substrates of Real and Imagined Sensorimotor Coordination. *Cerebral Cortex*, 15, 975-985.
- Palmer, C., e Krumhansl, C. L. (1990). Mental representations for musical meter. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 728-741.
- Parncutt, R. (1994). A perceptual model of pulse salience and metrical accent in musical rhythms. *Music perception*, 11, 409-464.
- Parsons, L. M., Hodges, D., Trimarchi, P. D., and Fox, P. (In preparazione). Brain Basis of Conducting Musical Scores.
- Parsons, L. M., Petacchi, A., J. D. Schmahmann, e Bower, J. M. (2009). Pitch discrimination in cerebellar patients: Evidence for a sensory deficit. *Brain Research*, 1303, 84-96.
- Patel, A. (2008). *Music, Language and the Brain*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Patel, A. (2010). Music, biological evolution, and the brain. In: M. Bailar (Ed.), *Emerging Disciplines*. Houston: Rice University Press.

- Pazzaglia, M., Pizzamiglio, L., Pes, E., Aglioti, S. M. (2008). The sound of actions in apraxia. *Current Biology*, 18, 1766–1772.
- Peretz, I. (1990). Processing of local and global musical information by unilateral brain-damaged patients. *Brain*, 113, 1185-1205.
- Peretz, I. (2006). The nature of music from a biological perspective. *Cognition*, 100(1), 1-32.
- Peretz, I. (2008). Musical disorders: From behavior to genes. *Current Directions in Psychological Science*, 17, 329-333.
- Peretz, I. e Hyde, K. L. (2003). What is specific to music processing? Insights from congenital amusia. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 362-367.
- Peretz, I. e Kolinsky, R. (1993) Boundaries of separability between melody and rhythm in music discrimination: A neuropsychological perspective. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 46, 301-325.
- Peretz, I. e Kolinsky, R. (1993). Boundaries of separability between melody and rhythm in music discrimination: A neuropsychological perspective. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 46, 301-325.
- Peretz, I. e Zatorre, R.J. (2005). Brain organisation for music processing. *Annual Review of Psychology*, 56, 89–114.
- Peretz, I., Belleville, S. & Fontaine, S. (1997). Dissociations entre musique et langage après atteinte cérébrale: un nouveau cas d’amusie sans aphasie. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 51, 354–368.
- Peretz, I., e Coltheart, M. (2003). Modularity of music processing. *Nature Neuroscience*, 6(7), 688–691.
- Peretz, I., Kolinsky, R., Tramo, M., Labrecque, R., Hublet, C., Demeurisse, G., et al. (1994). Functional dissociations following bilateral lesions of auditory cortex. *Brain*, 117, 1283–1301.

- Petacchi, A., Laird, A. R., Fox, P. T., e Bower, J. M. (2005). Cerebellum and Auditory Function: An ALE Meta-Analysis of Functional Neuroimaging Studies. *Human Brain Mapping*, 25, 118 – 128.
- Pfordresher, P. Q. (2006). Coordination of perception and action in music performance. *Advances in Cognitive Psychology*, 2, 183–198
- Phillips, J. C., Ward, R. (2002). S-R correspondence effects of irrelevant visual affordance: time Course and specificity of response activation. *Visual Cognition*, 9, 540–558.
- Pinker, S. (1997). *How the Mind Works*. London: Allen Lane.
- Pizzamiglio, L., Aprile, T., Spitoni, G., Pitzalis, S., Bates, E., D’Amico, S., e Di Russo, F. (2005). Separate neural systems for processing action- or non-action-related sounds. *Neuroimage*, 24, 852–861.
- Platel, H., Price, C., Baron, J, Wise, R., Lambert, J., Frackowiak, R.S.J., Lechevalier, B., e Eustache, F. (1997). The structural components of music perception. A functional anatomical study. *Brain*, 120, 229–243.
- Platel, H., Price, C., Baron, J, Wise, R., Lambert, J., Frackowiak, R. S. J., Lechevalier, B. e Eustache, F. (1997). The structural components of music perception. A functional anatomical study. *Brain*, 120, 229–243.
- Povel, D. J. e Essens, P. (1985). Perception of temporal patterns. *Music Perception*, 2, 411-441.
- Pratt, C. C. (1930). The spatial character of high and low tones. *Journal of Experimental Psychology*, 13, 278–285.
- Prinz, W. (1990). A common coding approach to perception and action. In: *Relationships between perception and action: Current approaches*, O. Neumann e W. Prinz (Eds). Springer.
- Prinz, W. (1992). Why don’t we perceive our brain states? *European Journal of Cognitive Psychology*, 4, 1–20.

- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9, 129–154.
- Pulvermüller, F. e Fadiga, L. (2010). Active perception: Sensorimotor circuits as a cortical basis for language. *Nature Reviews Neuroscience*, 11, 351–360.
- Racette, A., Bard, C., e Peretz, I. (2006). Making non-fluent aphasics speak: sing along! *Brain*, 129, 2571-2584.
- Ramnani, N. e Owen, A.M. (2004). Anterior prefrontal cortex: insights into function from anatomy and neuroimaging. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 184-194.
- Rao, S.M., Mayer, A.R., e Harrington, D.L. (2001). The evolution of brain activation during temporal processing. *Nature Neuroscience*, 4, 317-323.
- Rapp, B., (Ed) (2001). *The Handbook of Cognitive Neuropsychology*. Philadelphia, PA: Psychology Press.
- Remedios, R., Logothetis, N. K., e Kayser, C. (2010). Unimodal Responses Prevail within the Multisensory Claustrum. *The Journal of Neuroscience*, 30, 12902–12907.
- Repp, B. H. e Knoblich, G. (2009). Performed or observed keyboard actions affect pianists' judgements of relative pitch. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 62 (11), 2156-2170.
- Rizzolatti, G. e Sinigaglia, C. (2006). *So quel che fai. Il cervello che agisce e i neuroni specchio*. Milano, IT: Raffaello Cortina Editore.
- Rizzolatti, G., e Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169-192.
- Robin, D. A., Tranel, D. e Damasio, H. (1990). Auditory perception of temporal and spectral events in patients with focal left and right cerebral lesions. *Brain and Language*, 39, 539–555.
- Roffler, S. K. e Butler, R. A. (1968a). Localization of tonal stimuli in the vertical plane. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 43, 1260–1266.

- Roffler, S. K. e Butler, R. A. (1968b). Factors that influence the localization of sound in the vertical plane. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 43, 1255-1259.
- Rugg, M.D. e Wilding, E.L. (2000). Retrieval processing and episodic memory, *Trends in Cognitive Science*, 4, 108–115.
- Rumiati, R. I., Papeo, L. e Corradi-Dell’Acqua, C. (2010). Higher-level Motor Processes. *Annals of the New York Academy of Science*, 1191, 219–241.
- Rusconi, E., Kwan, B., Giordano, B. L., Umiltà, C., e Butterworth, B. (2006). Spatial representation of pitch height: The SMARC effect. *Cognition*, 99, 113–129.
- Sakai, K., Hikosaka, O., Miyauchi, S., Takino, R., Tamada, T., Iwata, N. K., e Nielsen, M. (1999). Neural representation of a rhythm depends on its interval ratio. *The Journal of Neurosciences*, 19, 10074-10081.
- Samson, S., Ehrlé, N. e Baulac, M. (2001). Cerebral substrates for musical temporal processes. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930, 166-178.
- Sanders, A. F. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychologica*, 53, 61–97.
- Särkämö, T., Tervaniemi, M., Laitinen, S., e coll. (2008). Music listening enhances cognitive recovery and mood after middle cerebral artery stroke. *Brain*, 131, 866-876
- Schellenberg, E. G. (2005). Music and Cognitive Abilities. *Current Directions in Psychological Science*, 14, 317-320.
- Schlaug, G., Marchina, S. e Norton, A. (2008). From singing to speaking: Why singing may lead to recovery of expressive language function in patients with Broca’s aphasia. *Music Perception*, 25, 315–323.
- Schlaug, G., Marchina, S., e Norton, A. (2009). Evidence for plasticity in white-matter tracts of patients with chronic Broca’s Aphasia undergoing intense intonation-based speech therapy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 385-394.

- Schön, D., Lorber, B., Spacal, M., and Semenza, C. (2004). A selective deficit in the production of exact musical intervals following right-hemisphere damage. *Cognitive Neuropsychology*, 21, 773-784.
- Schuppert, M., Münte, T. F., Wieringa, B. M., e Altenmüller, E. (2000). Receptive amusia: evidence for cross-hemispheric neural networks underlying music processing strategies. *Brain*, 123, 546–559.
- Seashore, C. E. (1938). *The psychology of music*. New York: McGraw-Hill.
- Shahin A, Bosnyak DJ, Trainor LJ, Roberts LE (2003) Enhancement of neuroplastic P2 and N1c auditory evoked potentials in musicians. *J Neurosci* 23, 5545-5552.
- Shahin, A. J., Roberts, L. E., Chau, W., Trainor, L. J., Miller, L. M. (2008). Music training leads to the development of timbre-specific gamma band activity. *Neuroimage*, 41, 113–122.
- Shenfield, T., Trehub, S. E., e Nakata, T. (2003). Maternal singing modulates infants arousal. *Psychology of music*, 31, 365-375.
- Shepard, R. N. (1982). Geometrical approximations to the structure of musical pitch. *Psychological Review*, 89, 305-333.
- Shepard, R. N. (1982). Structural representations of musical pitch. In D. Deutsch (Ed.), *The psychology of music*. San Diego, CA: Academic Press.
- Sloboda, J. A., e O’Neill, S. A. (2001). Emotions in everyday listening to music. In: P. N. Juslin e J. A. Sloboda (Eds.), *Music and Emotion: Theory and Research*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Smith, A., Taylor, E., Lidzba, K. e Rubia, K. (2003). A right hemispheric frontocerebellar network for time discrimination of several hundreds of milliseconds. *Neuroimage*, 20, 344-350.
- Smith, S. M. (2002). Fast robust automated brain extraction. *Human Brain Mapping*, 17, 143-155.

- Sonnarada, R.R., Gonzalez, D.A., Hansen, S., Elliot, D., & Lions, J.L. (2009). Spatial Properties of Perceived Pitch. *The Neurosciences and Music III: Disorders and Plasticity: Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 503–507.
- Stern, E. R., Gonzalez, R., Welsh, R. C., e Taylor, S. F. (2010). Updating Beliefs for a Decision: Neural Correlates of Uncertainty and Underconfidence. *The Journal of Neuroscience*, 30, 8032– 8041.
- Stewart, L., Von Kriegstein, K., Dalla Bella, S., Warren, J.D. e Griffiths, T. (2009). Disorders of musical cognition. In *Oxford Handbook of Music Psychology*. S. Hallam, I. Cross e M. Thaut, (Eds). New York: Oxford University Press.
- Stewart, L., von Kriegstein, K., Warren, J.D., e Griffiths, T.D. (2006). Music and the brain: disorders of musical listening. *Brain*, 129, 2533–2553.
- Stoet, G. e Hommel, B. (1999). Action planning and the temporal binding of response codes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1625–40.
- Stoet, G., e Hommel, B. (2002). Interaction between feature binding in perception and action. In W. Prinz e B. Hommel (Eds.), *Common mechanisms in perception and action: Attention & Performance XIX*. Oxford: Oxford University Press.
- Takahashi, N., Kawamura, M., Shinotou, H., Hirayama, K., Kaga, K., e Shindo, M. (1992). Pure word deafness due to left hemisphere damage. *Cortex*, 28, 295–303.
- Tan, S., Pfordresher, P. e Harré, R. (2010). *Psychology of music. From sound to significance*. New York: Psychology Press.
- Tanaka, S., Honda, M. e Sadato, N. (2005). Modality-Specific Cognitive Function of Medial and Lateral Human Brodmann Area 6. *The Journal of Neuroscience*, 25, 496–50.
- Temperley, D. (2001). *The cognition of basic musical structure*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Trehub, S. E. (2000). Human processing predispositions and musical universals. In: N. L. Wallin, B. Merkers, & S. Brown (Eds.), *The Origins of Music*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Trehub, S. E. e Trainor, L. J. (1998). Singing to infants: Lullabies and playsongs. *Advances in Infancy Research*, 12, 43-77.
- Trehub, S.E., e Thorpe, L.A. (1989). Infants' perception of rhythm: Categorization of auditory sequences by temporal structure. *Canadian Journal of Psychology*, 43, 217–229.
- Treisman, A. (1996). The binding problem. *Current Opinion in Neurobiology* 6:171–78.
- Treisman, A. (1998). Feature binding, attention and object perception. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B Biological Sciences*, 353, 1295–1306.
- Trimarchi, P. D. e Luzzatti, C. (2010). Implicit chord processing and motor representation in pianists. *Psychological Research*, DOI 10.1007/s00426-010-0292-5.
- Tucker, M., e Ellis, R. (1998). On the relations between seen objects and components of potential actions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 830–846.
- Ueda, K., & Ohgushi, K. (1987). Perceptual components of pitch: Spatial representation using a multidimensional scaling technique. *Journal of the Acoustical Society of America*, 82, 1193–1200.
- Ullen, F., Forssberg, H., e Ehrsson, H. H. (2003). Neural networks for the coordination of the hands in time. *Journal of Neurophysiology*, 89, 1126-1135.
- Umiltà, M. A., Kohler, E., Gallese, V., Fogassi, L., Fadiga, L., Keysers, C., e Rizzolatti, G. (2001). I know what you are doing: a neurophysiological study. *Neuron*, 31(1), 155-165.
- Ungerleider, L. G. e Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In: *Analysis of visual behavior*, D. Ingle, M. A. Goodale e R. J. W. Mansfield (Eds). Boston, MA: MIT Press.
- van den Heuvel, O.H., Groenewegen, H.J., Barkhof, F., Lazeron, R.H., van Dyck, R., e Veltman, D.J. (2003). Frontostriatal system in planning complexity: a parametric functional magnetic resonance version of Tower of London task. *NeuroImage*. 18, 367–374.

- Velanova, K., Jacoby, L.L., Wheeler, M.E., McAvoy, M.P., Petersen, S.E. e Buckner, R.L. (2003). Functional–anatomic correlates of sustained and transient processing components engaged during controlled retrieval, *Journal of Neuroscience*, 23, 8460–8470.
- Viviani, P. e Stucchi, N. (1992). Motor-perceptual interactions. In: *Tutorials in motor behavior, II*, G. E. Stelmach e J. Requin (Eds). Elsevier.
- Volz, K. G., Schubotz, R. I., e von Cramon, D. Y., (2005). Variants of uncertainty in decision-making and their neural correlates. *Brain Research Bulletin*, 67, 403–412.
- Walker, B. N. e Ehrenstein, A. (2000). Pitch and pitch change interact in auditory displays. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6, 15-30.
- Warren, J. D., Warren, J. E., Fox, N. C., e Warrington, E. K. (2003). Nothing to say, something to sing: primary progressive dynamic aphasia. *Neurocase*, 9(2), 140-155.
- Watkins, K. E., Strafella, A. P., e Paus, T. (2003). Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*, 41, 989–994.
- Wilson, S., Parsons, K., e Reutens, D. (2006). Preserved Singing in Aphasia: A Case Study of the Efficacy of Melodic Intonation Therapy. *Music Perception*, 24, 23-36.
- Winkler, I., Hadena, G.P., Ladinig, O., Sziller, I. e Honing, H. (2009). Newborn infants detect the beat in music. *PNAS*, 106, 2468–2471.
- Woolrich, M.W., Ripley, B.D., Brady, J.M., e Smith, S.M. (2001). Temporal autocorrelation in univariate linear modelling of fMRI data. *NeuroImage*, 14, 1370-1386.
- Worsley, K. J., Evans, A. C., Marrett, S., e Neelin, A. (1992). A three dimensional statistical analysis for CBF activation studies in human brain. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 12, 900-918.
- Yaqub, B.A., Gascon, G.G., Al-Nosha, M. e Whitaker, H. (1988). Pure word deafness (acquired verbal auditory agnosia) in an Arabic speaking patient. *Brain*, 111, 457–466.
- Zatorre, R. (2005). Music, the food of neuroscience? *Nature*, 434, 312-315.

- Zatorre, R. J., Chen, J. L., e Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production. *Nature Review Neuroscience*, 8, 547–558.
- Ziemann, U., Lonnecker, S., Steinhoff, B.J. e Paulus, W. (1996). Effects of antiepileptic drugs on motor cortex excitability in humans: a transcranial magnetic stimulation study. *Annals of Neurology*, 40, 367–378.
- Ziemann, U., Muellbacher, W., Hallett, M. e Cohen, L.G. (2001). Modulation of practice-dependent plasticity in human motor cortex. *Brain*, 124, 1171–1181.

Appendice

Tabella 7.1. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Pattern-Metro-Tempo > Rest (Tutti i soggetti). Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale	Sinistro	Giro Frontale mediale	BA 8	0	30	46	3,82
		Giro Precentrale	BA 4	-56	-8	42	5,23
		Giro Precentrale	BA 6	-64	4	42	3,43
	Destro	Giro Frontale inferiore	BA 9	48	6	24	4,18
		Giro Frontale inferiore	BA 45	46	24	0	2,98
		Insula anteriore	BA 13	46	14	12	5,09
		Giro Frontale mediale	BA 9	24	46	22	4,22
		Giro Frontale mediale	BA 8	10	26	46	3,86
		Giro Frontale medio	BA 6	48	10	44	6,03
		Giro Frontale medio	BA 6	34	14	52	5,59
		Giro Frontale medio	BA 6	30	-2	50	3,94
		Giro Frontale medio	BA 8	50	28	48	3,02
		Giro Frontale medio	BA 10	46	44	20	3,6
		Giro Frontale medio	BA 9	50	38	24	3,5
		Giro Precentrale	BA 4	44	-10	46	4,72
Limbico	Sinistro	Giro del Cingolo anteriore	BA 24	-6	2	48	5,01
		Destro	Giro del Cingolo anteriore	BA 32	10	26	42
	Parietale		Sinistro	Giro Sovramarginale	BA 40	-54	-50
Destro		Giro Postcentrale		BA 40	64	-28	20
		Precuneo	BA 7	24	-64	30	5,11
	Giro Sovramarginale	BA 40	50	-38	34	6,65	
Temporale	Sinistro	Giro Temporale superiore	BA 22	-54	-44	14	5,85
		Giro Temporale superiore	BA 42	-78	-24	8	5,71
		Giro Temporale superiore	BA 22	-44	-26	6	5,46
	Destro	Giro Temporale superiore	BA 13	50	-20	6	5,1
		Cervelletto	Destro	Crus I	42	-64	-34

Tabella 7.2. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Pattern > Rest (Tutti i soggetti). Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Temporale							
	Destro						
		Giro Temporale medio	BA 22	62	-46	4	14,7
		Giro Temporale medio	BA 22	60	-38	6	14,6
		Giro Temporale superiore	BA 42	72	-30	10	15,3
		Giro Temporale superiore	BA 22	66	-34	6	14,9
		Giro Temporale superiore	BA 41	48	-30	14	14,8
		Giro Temporale trasverso	BA 42	70	-6	10	15,1

Tabella 7.3. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Pattern > Pattern-Metro-Tempo (Tutti i soggetti). Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
	Sinistro						
		Giro Frontale mediale	BA 6, pre-SMA	-12	14	58	2
Limbico							
	Sinistro						
		Giro Paraippocampale	Amygdala	-22	-12	-16	1,9
		Giro del Cingolo anteriore	BA 32	-22	42	8	1,9
	Destro						
		Giro del Cingolo anteriore	BA 25	6	0	-6	2
		Giro Paraippocampale	BA 30	18	-34	-6	1,8
Cervelletto							
	Sinistro						
		Crus I		-46	-72	-30	1,9
		Vermis, Lobulo VI		-2	-64	-16	1,8
	Destro						
		Lobulo VI		40	-66	-22	2

Tabella 7.4. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Metro > Rest (Tutti i soggetti). Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
Destro							
		Giro Frontale inferiore	BA 9	60	26	20	10,2
		Giro Frontale inferiore	BA 44	60	20	14	10,1
		Giro Frontale inferiore	BA 44	56	20	14	9,61
		Giro Frontale medio	BA 46	42	34	10	6,72
		Giro Precentrale	BA 44	56	18	4	11
		Giro Precentrale	BA 6	48	4	24	6,82

Tabella 7.5. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Metro > Pattern-Metro-Tempo (Tutti i soggetti). Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
Sinistro							
		Giro Frontale inferiore	BA 47	-38	28	-8	1,7
		Giro Frontale medio	BA 10	-34	62	0	2
		Giro Precentrale	BA 6	-50	0	28	1,8
		Insula	BA 13	-44	16	12	2,1
Destro							
		Sub-Gyral	BA 10	48	44	-8	1,7
		Giro Frontale superiore	BA 9	46	42	24	1,7
Occipitale							
Sinistro							
		Cuneo	BA 18	-20	-98	18	1,8
		Giro Occipitale medio	BA 19	-32	-78	26	1,9
Temporale							
Sinistro							
		Giro Fusiforme	BA 37	-30	-58	-14	1,9
Destro							
		Giro Temporale inferiore	BA 20	62	-16	-32	1,7
		Giro Fusiforme	BA 37	50	-36	-14	2,2
Sottocorticale							
Destro							
		Nucleo Lenticolare	Globo Pallido	24	-14	-10	2
		Claustro		30	28	0	1,9
Cervelletto							
Destro							
		Crus I		48	-62	-40	1,6
		Lobulo VI		34	-78	-20	1,9

Tabella 7.6. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Tempo > Rest (Tutti i soggetti). Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
	Destro						
		Giro Frontale medio	BA 6	30	0	46	15,2
		Giro Precentrale	BA 6	36	-6	50	15,2
		Giro Frontale medio	BA 6	34	0	54	15,1
		Giro Frontale medio	BA 8	48	12	40	14,9
		Insula	BA 13	52	-38	28	14,6
Parietale							
	Destro						
		Lobulo Parietale inferiore	BA 40	62	-26	30	14,9
		Lobulo Parietale inferiore	BA 40	54	-42	40	14,8
		Giro Sovramarginale	BA 40	48	-44	34	14,6
Temporale							
	Destro						
		Giro Temporale superiore	BA 22	64	-10	2	15,1
		Giro Temporale superiore	BA 42	78	-28	20	14,8

Tabella 7.7. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Tempo > Pattern-Metro-Tempo (Tutti i soggetti). Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
	Sinistro						
		Giro Frontale medio	BA 6	-20	0	48	1,8
	Destro						
		Giro Precentrale	BA 6	42	-8	52	2
		Giro Frontale medio	BA 6	26	-2	50	1,9
Limbico							
	Sinistro						
		Giro Paraippocampale	Amigdala	-34	-4	-18	2,1
		Giro del Cingolo posteriore	BA 31	0	-44	30	2,1
		Giro del Cingolo	BA 24	-12	6	30	2,4
	Destro						
		Giro del Cingolo posteriore	BA 23	2	-22	30	2,2
		Giro del Cingolo posteriore	BA 31	14	-36	46	2
Parietale							
	Sinistro						
		Giro Postcentrale	BA 2	-52	-24	30	1,8
	Destro						
		Lobulo Parietale superiore	BA 7	34	-54	46	2
		Precuneo	BA 7	22	-50	46	2
Temporale							
	Destro						
		Giro Temporale superiore	BA 22	44	-54	18	1,9

Tabella 7.8. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Pattern-Metro-Tempo nel gruppo dei Musicisti rispetto ai Non-Musicisti. Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
	Sinistro						
		Giro Frontale mediale	BA 25	-10	8	-24	4,45
	Destro						
		Giro Frontale inferiore	BA 47	32	10	-22	4,3
		Giro Frontale inferiore	BA 13	36	10	-22	4,29
		Giro Frontale mediale	BA 10	8	52	-14	3,7
		Giro Frontale medio	BA 8	36	28	44	4,25
		Giro Frontale medio	BA 8	34	48	48	3,97
		Giro Frontale superiore	BA 8	20	42	48	7,17
		Claustro		26	20	16	3,96
Limbico							
	Sinistro						
		Giro del Cingolo anteriore	BA 32	-10	46	-14	4,37
		Giro del Cingolo anteriore	BA 32	-12	42	8	3,81
		Giro Paraippocampale	BA 28	-20	-10	-26	6,01
	Destro						
		Giro del Cingolo	BA 32	22	22	32	3,02
Occipitale							
	Sinistro						
		Giro Occipitale medio	BA 19	-54	-72	-10	4,4
		Giro Occipitale medio	BA 19	-50	-92	10	4,18
	Destro						
		Cuneo	BA 17	22	-80	12	3,23
		Giro Fusiforme	BA 19	26	-86	-8	4,18
		Giro Occipitale inferiore	BA 18	38	-96	-14	7,26
		Giro Linguale	BA 19	34	-68	0	4,02
		Giro Occipitale medio	BA 19	48	-74	12	3,73
Temporale							
	Sinistro						
		Giro Fusiforme	BA 20	-46	-42	-26	4,22
		Giro Fusiforme	BA 37	-54	-70	-18	4,45
		Giro Temporale inferiore	BA 21	-62	-10	-18	3,67
		Giro Temporale medio	BA 21	-54	-22	-20	4,65
		Giro Temporale medio	BA 21	-68	0	-22	4,03
		Giro Temporale inferiore	BA 20	-40	-16	-20	4,27
		Giro Temporale superiore	BA 38	-32	2	-24	4,97
	Destro						
		Giro Fusiforme	BA 20	40	-8	-26	4,58
		Giro Temporale medio	BA 38	52	8	-22	3,94
		Giro Temporale superiore	BA 38	56	18	-20	4,16
		Giro Temporale medio	BA 39	38	-70	16	4,05

Tabella 7.9. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Pattern-Metro-Tempo nel gruppo dei Non-Musicisti rispetto ai Musicisti. Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
	Sinistro						
		Giro Frontale mediale	BA 32	-10	20	44	6,15
		Giro Frontale mediale	BA 32	-12	16	46	5,59
		Giro Frontale mediale	BA 6, pre-SMA	-4	6	54	5,08
		Lobulo Paracentrale	BA 6	-6	-26	54	4,57
	Destro						
		Giro Frontale inferiore	BA 45	58	32	-4	4,05
		Giro Frontale mediale	BA 6, SMA	6	0	58	5,41
		Insula	BA 13	52	8	2	4,08
Parietale							
	Sinistro						
		Precuneo	BA 7	-4	-48	50	4,22
Temporale							
	Destro						
		Giro Temporale superiore	BA 22	68	-6	-2	4,49
		Giro Temporale medio	BA 21	66	-26	-4	4,13
Sottocorticale							
	Sinistro						
		Nucleo Lenticolare	Putamen	-30	4	0	5,09
		Nucleo Caudato	Testa	0	2	-2	4,96
	Destro						
		Nucleo Lenticolare	Putamen	30	-10	2	5,14
		Nucleo Lenticolare	Putamen	32	-4	0	4,59
Cervelletto							
	Sinistro						
		Vermis lobulo X		-2	-44	-18	5,53
		Vermis lobulo VI		-4	-72	-22	5,44
		Vermis lobulo IV		0	-44	-12	5,32
	Destro						
		Lobulo VI		20	-68	-18	5,11

Tabella 7.10. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Pattern nel gruppo dei Musicisti rispetto ai Non-Musicisti. Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
	Sinistro						
		Insula	BA 13	-40	-44	24	3,7
	Destro						
		Giro Precentrale	BA 6	60	4	32	3,6
		Giro Frontale superiore	BA 8	24	46	42	3,9
		Giro Frontale Inferiore	BA 13	40	10	-20	3,1
Limbico							
	Sinistro						
		Giro del Cingolo anteriore	BA 24	-16	38	-6	3
	Destro						
		Giro del Cingolo posteriore	BA 31	6	-34	32	2,8
Sottocorticale							
	Destro						
		Claustro		28	18	16	3,1
Cervelletto							
	Sinistro						
		Lobulo VI		-24	-46	-30	3,3
	Destro						
		Vermis, Lobulo IX		8	-54	-40	4

Tabella 7.11. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Pattern nel gruppo dei Non-Musicisti rispetto ai Musicisti. Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale	Sinistro	Giro Precentrale	BA 6	-50	2	44	2,8
		Giro Frontale mediale	BA 6, SMA	-2	8	52	4,1
		Insula	BA 13	-44	-20	-6	2,5
	Destro	Giro Frontale superiore	BA 9	18	54	22	3,2
	Limbico	Sinistro	Giro del Cingolo posteriore	BA 29	-2	-50	8
Parietale	Destro	Giro Postcentrale	BA 43	66	-14	16	3
Temporale	Sinistro	Giro Temporale medio	BA 21	-60	-34	-6	3,1
		Giro Temporale trasverso	BA 41	-34	-36	10	3,7
Sottocorticale	Destro	Caudato	Corpo	8	16	16	4,1
Cervelletto	Sinistro	Vermis, Lobulo VI		-4	-72	-20	3,7
	Destro	Lobulo VI		22	-74	-18	3,4
		Crus I		12	-92	-18	3,8

Tabella 7.12. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Metro nel gruppo dei Musicisti rispetto ai Non-Musicisti. Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
	Sinistro						
		Insula	BA 13	-38	-22	22	9,7
	Destro						
		Giro Frontale superiore	BA 8	24	30	46	10
		Giro Frontale superiore	BA 8	24	40	50	2,3
Temporale							
	Sinistro						
		Giro Temporale superiore	BA 22	-54	-60	20	9,7
Cervelletto							
	Sinistro						
		Lobulo V		-18	-52	-16	9,5

Tabella 7.13. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Metro nel gruppo dei Non-Musicisti rispetto ai Musicisti. Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
	Sinistro						
		Giro Frontale medio	BA 6	-36	6	54	9,1
		Lobulo Paracentrale	BA 6	-4	-24	52	8,1
	Destro						
		Giro Frontale mediale	BA 6	12	0	54	9,9
		Insula	BA 13	46	18	0	9,8
Parietale							
	Destro						
		Lobulo Parietale inferiore	BA 40	56	-46	46	10,05
Temporale							
	Sinistro						
		Giro Temporale superiore	BA 22	-56	4	-2	2,6
	Destro						
		Giro Temporale medio	BA 21	70	-28	-6	10
Sottocorticale							
	Sinistro						
		Nucleo Lenticolare	Putamen	-28	-6	0	3,4
	Destro						
		Caudato	Corpo	16	0	20	8,9
Cervelletto							
	Sinistro						
		Vermis, Lobulo X		-6	-50	-14	7,8
		Lobulo VI		-10	-78	-18	10

Tabella 7.14. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Tempo nel gruppo dei Musicisti rispetto ai Non-Musicisti. Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
	Sinistro						
		Giro Frontale superiore	BA 10	-28	60	10	3,5
		Insula	BA 13	-34	-24	24	2,8
	Destro						
		Giro Frontale superiore	BA 8	20	40	48	3,4
Occipitale	Destro						
		Giro Fusiforme	BA 19	32	-84	-12	3,8
Parietale							
	Sinistro						
		Lobulo Parietale inferiore	BA 40	-52	-42	38	3,7
Temporale							
	Sinistro						
		Giro Fusiforme	BA 37	-46	-62	-12	3,5
		Giro Temporale superiore	BA 38	-40	10	-22	3,5
		Giro Temporale medio	BA 21	-52	4	-22	3,3
		Giro Temporale medio	BA 37	-46	-66	-4	3
		Giro Temporale inferiore	BA 20	-48	-22	-22	3,9
Sottocorticale							
	Destro						
		Caudato	Coda	30	-38	10	4,3

Tabella 7.15. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Tempo nel gruppo dei Non-Musicisti rispetto ai Musicisti. Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
	Sinistro	Giro Frontale mediale	BA 6	-8	20	44	3,07
	Destro	Giro Frontale superiore	BA 8	4	38	44	2,9
Limbico							
	Sinistro	Giro del Cingolo posteriore	BA 23	2	-56	24	3,7
	Destro	Giro del Cingolo posteriore	BA 30	6	-48	24	3,2
Sub-corticale							
	Sinistro	Claustro		-34	6	6	3,5
	Destro	Caudato	Testa	14	16	0	2,9
		Talamo		8	-6	0	3,4
		Nucleo Lenticolare	Putamen	32	-14	0	2,8
Cervelletto							
	Sinistro	Lobulo VI		-2	-70	-24	3,3
	Destro	Lobulo VI		22	-70	-16	3,1

Tabella 7.16. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Melodia > Rest (Tutti i soggetti). Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale	Destro	Insula	BA 13	46	-14	8	15,2
		Insula	BA 13	42	-12	10	14,1
Parietale	Destro	Giro Postcentrale	BA 40	60	-20	20	14,1
		Giro Postcentrale	BA 40	58	-24	22	13,9
Temporale	Destro	Giro Temporale superiore	BA 42	70	-28	22	15
Sottocorticale	Destro	Claustro		42	-12	6	14,2
Cervelletto	Destro	Lobulo V		34	-38	-26	15,3
		Lobulo VI		38	-42	-26	14,8
		Crus I		36	-78	-36	15,1
		Lobulo VI		24	-64	-30	14,9
		Crus I		36	-74	-28	14,9
		Crus I		30	-76	-38	14,8

Tabella 7.17. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Melodia nel gruppo dei Musicisti rispetto ai Non-Musicisti. Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale							
	Sinistro						
		Giro Frontale inferiore	BA 45	-54	18	22	2,6
		Giro Frontale superiore	BA 10	-24	48	22	2,5
	Destro						
		Giro Frontale mediale	BA 9	10	52	14	3,8
		Giro Frontale superiore	BA 10	20	58	-12	4
Limbico							
	Sinistro						
		Giro Paraippocampale	BA 28	-18	-12	-26	3
Parietale							
	Sinistro						
		Precuneo	BA 7	-18	-50	44	4,1
Sottocorticale							
	Sinistro						
		Talamo	Nucleo Ventroposterolaterale	-22	-20	8	3,8

Tabella 7.18. Aree con un'attivazione significativa del Flusso Ematico Cerebrale Regionale (rCBF) per la condizione Melodia nel gruppo dei Non-Musicisti rispetto ai Musicisti. Le coordinate x, y, z si riferiscono al voxel maggiormente attivo di ogni regione indicata relativamente a un spazio stereotassico standard (MNI).

Lobo	Emisfero	Regione	BA	x	y	z	Z-Score
Frontale	Destro	Giro Frontale inferiore	BA 13	48	30	-2	3,7
Occipitale	Sinistro	Cuneo	BA 19	2	-80	42	3,2
Parietale	Sinistro	Precuneo	BA 7	-2	-50	50	4,7
Temporale	Sinistro	Giro Temporale superiore	BA 22	-54	6	-2	2,9
	Destro	Giro Temporale superiore	BA 22	54	4	-2	2,7
Cervelletto	Sinistro	Vermis, Lobulo III		-4	-42	-22	3,5
		Lobulo VI		-10	-80	-24	3,5