

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia dello Sviluppo e della Socializzazione - DPSS

Corso di laurea in:

**SCIENZE PSICOLOGICHE DELLO SVILUPPO, DELLA PERSONALITÀ E DELLE
RELAZIONI INTERPERSONALI [PS2295]**

Tesi di laurea:

Associazione cross-modale tra frequenza sonora e luminanza nel pulcino domestico

Pitch-luminance crossmodal association in the domestic chick

Relatore:

Prof.ssa Lucia Regolin

Correlatore:

Dott.ssa Maria Loconsole

Laureando: Andrea Gasparini

Matricola: 1191110

Anno Accademico 2021/22

Associazione cross-modale tra frequenza sonora e luminanza nel pulcino domestico

Pitch-luminance crossmodal association in the domestic chick

Indice

1	Introduzione	
1.1	Cos'è l'associazione cross-modale?.....	1
1.2	Chiarimenti sulla terminologia.....	2
1.3	Prime ricerche.....	4
1.4	Conseguenze sull'elaborazione delle informazioni nella classificazione rapida....	5
1.5	Tipologie di associazione cross-modale.....	8
1.6	Conseguenze sull'integrazione/percezione multi-sensoriale.....	9
1.7	La relazione tra associazioni cross-modali e la sinestesia.....	10
1.8	I sub-strati neurali alla base delle associazioni cross-modali.....	11
1.9	Esempi di studi in animali non umani.....	13
1.10	Perchè il pulcino di pollo domestico <i>Gallus gallus</i> ?.....	13
2	Materiali e metodi	
2.1	Soggetti e condizioni di allevamento.....	15
2.2	Training.....	16
2.3	Test.....	17
3	Analisi dei dati e risultati	
3.1	Analisi dei dati.....	19
3.2	Risultati.....	19
4	Discussione	
4.1	Confronto con altri studi.....	21
4.2	Associazione strutturale o statistica?.....	22
4.3	Filogenesi del meccanismo.....	23
4.4	Conclusioni.....	24
	Bibliografia.....	25

1 Introduzione

1.1 Cos'è l'associazione cross-modale?

I sensi sono bombardati da molti e diversi segnali provenienti dalle diverse modalità sensoriali; è quindi necessario, per costruirsi una rappresentazione unitaria e integrata dell'ambiente circostante, combinare tra loro le singole rappresentazioni (a prescindere dalla modalità sensoriale) che si riferiscono allo stesso oggetto e allo stesso tempo tenere separate quelle appartenenti a oggetti diversi. Un meccanismo che sembra aiutare il nostro cervello a sapere quali stimoli integrare tra loro e quali tenere separati sembra essere l'associazione cross-modale (Spence, 2011).

Parte dei fattori che permettono questo tipo di associazione sembrano essere la coincidenza temporale (ad esempio: Jones & Jarick, 2006; Shore, Barnes, & Spence, 2006; van Wassenhove, Grant, & Poeppel, 2007) e quella spaziale (Frens, Van Opstal & Van der Willigen, 1995; Slutsky & Recanzone, 2001), ma quest'ultima solo in alcuni casi (Bertelson, Vroomen, Wiegand, & de Gelder, 1994; Innes-Brown & Crewther, 2009; Jones & Jarick, 2006; Jones & Munhall, 1997; Recanzone, 2003; Vroomen & Keetels, 2006).

Altre influenze, negli esseri umani, sono dovute alla congruenza semantica o alla congruenza sinestetica. Con congruenza semantica (YC Chen & Spence, 2010; Doehrmann & Naumer, 2008; Grassi & Casco, 2010; Laurienti, Kraft, Maldjian, Burdette, & Wallace, 2004; Naumer & Kaiser, 2010) e sinestetica (Evans & Treisman, 2010; Gallace & Spence, 2006; Makovac & Gerbino, 2010; Parise & Spence, 2008a, 2009), ci si riferisce ad una corrispondenza in termini di identità/significato, come ad esempio nel caso in cui il suono di un abbaio viene più facilmente abbinato all'immagine di un cane invece che all'immagine di un gatto (Hein et al., 2007; Molholm, Ritter, Javitt, & Foxe, 2004) o la presentazione visiva di una lettera dell'alfabeto abbinata al suono fonetico corrispondente rispetto al suono fonetico di una diversa lettera (van Atteveldt, Formisano, Goebel, & Blomert, 2004). Con congruenza sinestetica si fa invece riferimento a corrispondenze tra caratteristiche più basilari dello stimolo, presumibilmente non ridondanti (come altezza, luminosità e dimensione). Si ipotizza che gli stimoli congruenti semanticamente e sinesteticamente saranno più probabilmente associati tra loro, i.e., "effetto unità" (Spence, 2007; Vatakis, Ghazanfar, & Spence, 2008; vedi anche Welch & Warren, 1980).

1.2 Chiarimenti sulla terminologia

I termini *corrispondenza sinestetica* e *associazione sinestetica* sono stati usati per descrivere solo quelle corrispondenze tra dimensioni sensoriali non ridondanti (come tra altezza nell'udito e luminosità nella visione). Al contrario, gli altri termini, come *corrispondenza intermodale* o *somiglianza intermodale*, hanno una copertura più ampia, includendo sia le corrispondenze sinestetiche che le corrispondenze tra caratteristiche dello stimolo codificate in modo ridondante. Queste ultime fanno riferimento a quelle caratteristiche che possono essere potenzialmente percepite attraverso diverse modalità sensoriali, come la dimensione o la forma di un oggetto, dato che entrambe possono essere percepite sia attraverso la visione che il tatto (stereognosia), o la durata di un evento che può essere percepita attraverso la visione e l'udito. Ad esempio, nel caso di un cane che abbaia è possibile percepire la durata dell'evento sia sentendo (udito) quanto dura nel tempo il suono, sia osservando (vista) per quanto tempo il cane muove il muso. Bisogna tuttavia fare attenzione al fatto che alcune corrispondenze cross-modali che potrebbero inizialmente sembrare non ridondanti, come tra tono acustico e dimensione, potrebbero, a un esame più attento, riflettere la codifica ridondante della dimensione dell'oggetto. In particolare, il termine *corrispondenza cross-modale* è usato per riferirsi a un effetto di compatibilità tra attributi di uno stimolo (cioè un oggetto o un evento) in diverse modalità sensoriali (che siano ridondanti o meno). Tali corrispondenze si verificano tra le dimensioni dello stimolo polarizzato, in modo tale che uno stimolo più o meno estremo su una data dimensione dovrebbe essere compatibile con un valore più o meno estremo sulla dimensione corrispondente (ad esempio un suono estremamente acuto o estremamente grave associato con un colore di luminanza estremamente alta o estremamente bassa, come bianco o nero). Un aspetto importante di tutte queste associazioni cross-modali è che sono condivise da un gran numero di persone e alcune potrebbero essere universali perché basate più su processi biologici invece che culturali. È importante notare che ci sono un certo numero di modi diversi in cui stimoli, oggetti e/o eventi possono essere abbinati in diverse modalità sensoriali (Marks, 1978). Al livello più elementare, questi possono essere messi in relazione in base ad alcune caratteristiche amodali (Marks, Szczesiul, & Ohlott, 1986). Con il termine amodale ci si riferisce a quelle caratteristiche degli stimoli, oggetti o eventi che possono essere identificate in più di una modalità sensoriale, sebbene non necessariamente in tutte. Alcuni esempi sono: la durata e lo schema temporale degli eventi (Frings & Spence, 2010; Guttman, Gilroy, & Blake, 2005; Marks, 1987b; Radeau & Bertelson, 1987; Thomas, 1941), la forma e la dimensione degli oggetti dato che possono essere percepite entrambe sia dalla vista che dal tatto, oppure l'intensità (es. Lewkowicz & Turkewitz, 1980; Marks, 1987a; Marks et al., 1986; R.

Walker, 1987), movimento e posizione. Con il termine modale, al contrario, ci riferiamo a caratteristiche/attributi che sono percepibili da una singola modalità sensoriale, come ad esempio l'altezza di un suono o il colore. Sono state dimostrate varie corrispondenze cross-modali tra diverse caratteristiche di uno stimolo sia modali che amodali. Ad oggi, ci sono già alcune prove che quando i diversi sensi forniscono informazioni ridondanti sulla stessa caratteristica di stimolo amodale (come il suo modello temporale), aumenta la probabilità di integrazione multisensoriale (ad esempio: se uno stimolo visivo e uno uditivo compaiono e scompaiono nello stesso momento aumenta la probabilità che vengano integrati) (vedi Frings & Spence, 2010; Radeau & Bertelson, 1987; Thomas, 1941; vedi anche Spence, 2007).

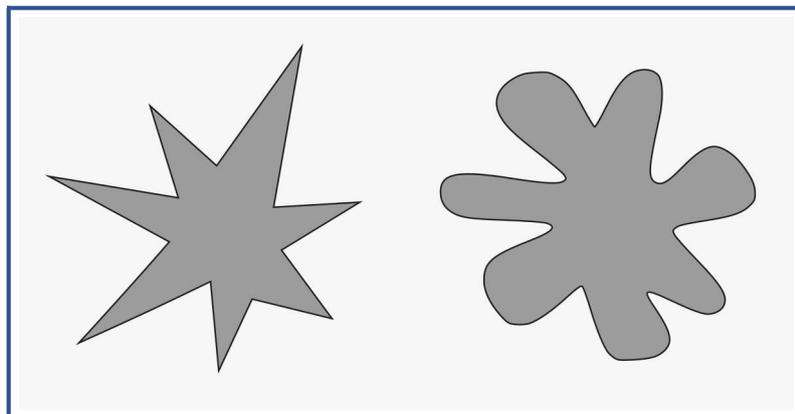
Al livello successivo, associazioni tra gli stimoli, gli oggetti e/o gli eventi, possono verificarsi tra caratteristiche diverse, apparentemente non correlate (e in alcuni casi modali) presenti in due o più modalità sensoriali, come quando le persone abbinano suoni acuti a oggetti piccoli e/o luminosi (ad es. Mondloch, C. J., & Maurer, D. 2004).

Le corrispondenze cross-modali tra gli stimoli possono anche essere stabilite a un livello più astratto, come in termini di piacevolezza, significato cognitivo o attività (vedi Bozzi & Flores D'Arcais, 1967; Crisinel & Spence, 2010a; Hartshorne, 1934; Janković, 2010; Lyman, 1979; Osgood, Suci, & Tannenbaum, 1957). In un filone correlato, è stato anche suggerito che le corrispondenze cross-modali possono essere stabilite a livello dell'effetto che gli stimoli hanno sull'osservatore: ad esempio, gli stimoli possono essere abbinati se entrambi aumentano il livello di vigilanza o eccitazione di un osservatore, o se entrambi hanno lo stesso effetto sullo stato emotivo/affettivo/umore di un osservatore (vedi, ad esempio, Boernstein, 1936, 1970; Collier, 1996; Cowles, 1935; Poffenberger & Barrows, 1924; Simpson, Quinn, & Ausubel, 1956; vedi anche Lewkowicz & Turkewitz, 1980). Ci sono ad oggi prove ragionevoli per supportare l'affermazione che le corrispondenze cross-modali possono verificarsi a tutti questi livelli (cioè, dalle corrispondenze tra le proprietà dello stimolo amodale di basso livello come la durata, fino alle corrispondenze cognitive di alto livello basate sul significato/valenza dello stimolo).

1.3 Prime ricerche

Le corrispondenze cross-modali sono note agli psicologi dalla prima metà del '900, inizialmente più improntate sul simbolismo sonoro. Ad esempio, Sapir (1929) ha mostrato l'esistenza di un'associazione cross-modale tra i suoni di alcune vocali e la dimensione dell'oggetto. Köhler (1929) ha osservato che la maggior parte delle persone abbina una forma arrotondata globulare con la non-parola "Baluma" e una forma angolare con bordi dritti con la non-parola "Takete", piuttosto che viceversa (Questo fenomeno è molto conosciuto ancora oggi e venne battezzato *effetto bouba/kiki*, prendendo il nome dalle parole usate in una replica dell'esperimento di Köhler fatta da Ramachandran e Hubbard, (2001, 2003)) (Figura 1).

Nonostante la maggioranza delle ricerche sull'associazione cross-modale riguardano le corrispondenze tra stimoli visivi e uditivi, vi sono state anche molte ricerche che hanno documentato associazione cross-modali tra molte diverse coppie di modalità sensoriali, come tra visione e tatto (ad es. , Martino & Marks, 2000; GA Morgan, Goodson, & Jones, 1975; Simner & Ludwig, 2009), tra suono e tatto (ad es., P. Walker & Smith, 1985; Yau et al. 2009; vedi anche von Békésy, 1959), e tra sapori e suoni (vedi Bronner, 2011; Bronner et al. 2008; Crisinel & Spence, 2009, 2010a, 2010b; Holt-Hansen, 1968, 1976; Rudmin & Cappelli, 1983; Simner, Cuskley & Kirby, 2010). Sembra quindi probabile che esistano corrispondenze cross-modali tra tutti i possibili abbinamenti di modalità sensoriali.



(Figura 1) Figure dell'effetto bouba/kiki, il primo suono viene tipicamente associato alla figura di destra, mentre il secondo suono viene tipicamente associato alla figura di sinistra.

1.4 Conseguenze sull'elaborazione delle informazioni nella classificazione rapida

Vi sono molti studi che hanno indagato le conseguenze delle associazioni cross-modali tra stimoli uditivi e visivi sull'elaborazione delle informazioni in adulti umani neurologicamente "normali" (cioè non sinestetici). Si tratta di studi principalmente interessati a valutare l'attenzione selettiva, in cui i partecipanti dovevano discriminare gli stimoli presentati in una modalità sensoriale e allo stesso tempo ignorare quelli presenti in un'altra modalità.

Uno dei primi studi (Bernstein & Edelstein, 1971) dimostrò che le persone rispondono più lentamente agli stimoli visivi quando la loro elevazione (posizione spaziale alta o bassa) risulta essere incoerente con l'altezza relativa di un suono che è irrilevante per il compito (effetto simile all'effetto Stroop cross-modale; esempi: Cowan & Barron, 1987; MacLeod, 1991; Stroop, 1935). Questa associazione cross-modale tra elevazione visiva e altezza uditiva è ad oggi una delle più robuste (vedi Evans & Treisman, 2010), e sembrano esserne sensibili anche bambini di soli 6 mesi d'età (Braaten, 1993). Un altro esempio simile è stato riscontrato in un compito dove i tempi di risposta erano più lunghi quando bisognava discriminare la grandezza visiva di uno stimolo (grande o piccolo) mentre era presentato allo stesso tempo un suono di altezza acustica non congruente rispetto a uno congruente (Marks et al. 1987). Gallace e Spence (2006) hanno inoltre osservato che l'effetto di congruenza cross-modale scompare se le prove con suoni alti, bassi e senza suono vengono presentate in blocchi separati. Questo supporta precedenti suggerimenti secondo cui gli effetti di corrispondenza cross-modale tipicamente osservati in laboratorio tendono principalmente ad essere relativi (e non assoluti, come nel caso di molti tipi di sinestesia: Marks, 2000; sebbene si veda Cytowic, 1993; Cytowic & Wood, 1982). Tuttavia, questo effetto sembra variare in base alla dimensione indagata dello stimolo; ad esempio, in uno studio (Marks et al. 1986) è stato scoperto che mentre l'abbinamento cross-modale della durata era quasi assoluto, l'abbinamento dell'intensità ha mostrato un certo compromesso tra l'equivalenza assoluta e il confronto relativo (contestuale). Una possibilità è che gli effetti relativi siano più importanti nelle corrispondenze semantiche e nelle corrispondenze cross-modali tra dimensioni correlate dello stimolo, come la leggerezza e l'altezza. Viceversa, la probabilità di mostrare un effetto assoluto presumibilmente aumenta nel caso di corrispondenze cross-modali tra coppie di dimensioni che si riferiscono alla stessa proprietà di stimolo amodale sottostante (come la durata).

In letteratura, sono stati riportati diversi esempi di cross-modali tra dimensioni uditive e visive tramite il compito di classificazione rapida (Tabella 1), ma è importante notare che non tutte danno luogo a effetti significativi; ad esempio finora non è stata osservata alcuna corrispondenza cross-modale tra altezza e tonalità (blu contro rosso; Bernstein, Eason, &

Schurman, 1971), tra volume e luminosità (Marks, 1987a) o tra altezza uditiva e contrasto visivo (Evans & Treisman 2010).

Ricapitolando, i risultati degli studi di classificazione rapida qui riportati mostrano che le corrispondenze cross-modali influenzano la velocità (e in alcuni casi l'accuratezza) dell'elaborazione delle informazioni. Dimostrano che le persone trovano più difficile ignorare i distrattori in una modalità sensoriale che condivide una corrispondenza intermodale con gli stimoli con cui stanno effettuando le loro risposte di classificazione rapida. Tuttavia, tali studi non dimostrano che gli stimoli presentati nelle diverse modalità vengano integrati a livello percettivo, perché potrebbero invece operare a livello del processo decisionale. Queste interazioni dimensionali, tra gli stimoli target e gli stimoli irrilevanti, potrebbero essere il risultato di un fallimento dell'attenzione selettiva.

Di conseguenza, Parise e Spence (2008b) hanno dimostrato che la corrispondenza cross-modale tra dimensione visiva e altezza uditiva può essere dimostrata usando una versione del Test di Associazione Implicita (Greenwald, McGhee & Schwartz, 1998), dove ai partecipanti era richiesto di discriminare quanto più rapidamente e precisamente possibile, tra una sequenza di stimoli visivi o uditivi, alternati casualmente. Parise e Spence (2008b) hanno dimostrato che le persone hanno trovato molto più facile rispondere a stimoli visivi grandi e toni bassi con una chiave di risposta e stimoli visivi più piccoli e toni più alti con un'altra chiave di risposta rispetto a quando la mappatura degli stimoli alle risposte è stata invertita. Dato che i partecipanti hanno risposto a ogni obiettivo in questo paradigma, l'attenzione selettiva non può spiegare gli effetti sulle prestazioni osservati. Tuttavia, questo ancora non chiarisce se la spiegazione sia a livello percettivo o decisionale (questo punto verrà ripreso nel paragrafo 1.6).

Dimensione uditiva	Dimensione visiva	Associazione cross-modale	Suono forte/acuto corrisponde a:	Studi
Tono acustico	Elevazione	Si	Alta elevazione	Ben-Artzi e Marks (1995); Bernstein e Edelstein (1971); Evans e Treisman (2010); Melara e O'Brien (1987); Patching e Quinlan (2002)
	Luminosità	Si	Stimolo più luminoso	Marchi (1987a)
	Leggerezza	Si	Stimolo più leggero	Marchi (1987a); Martino e Marchi (1999); Melara (1989a)
	Forma/angolarità	Si	Forma più angolare	Marchi (1987a)
	Taglia	Si	Oggetto più piccolo	Evans e Treisman (2010); Gallace e Spence (2006)
	Frequenza spaziale	Si	Alta frequenza spaziale	Evans e Treisman (2010)
	Direzione di movimento	Si	Movimento verso l'alto	Clark e Brownell (1976)
	Contrasto	No	/	Evans e Treisman (2010)
	Tinta	No	/	Bernstein, Eason e Schurman (1971)
Sonorità	Luminosità	Si	Stimolo più luminoso	Marchi (1987a)
	Leggerezza	No	/	Marchi (1987a)

(Tabella 1) Riepilogo delle corrispondenze cross-modali che influenzano le prestazioni dei soggetti trovate tramite il compito di classificazione rapida, insieme ai risultati nulli (Adattato da Spence, 2011).

1.5 Tipologie di associazione cross-modale

Vi sono 3 principali tipologie di associazione cross-modale, risultate dagli studi di classificazione rapida. La prima tipologia, detta *statistica*, avviene per apprendimento di quelle coppie di dimensioni dello stimolo che risultano essere correlate in natura (come, ad esempio, la correlazione tra la dimensione di un oggetto e la sua massa). È anche più probabile che le corrispondenze cross-modali basate su tali regolarità statistiche siano universali, poiché le proprietà degli oggetti sono determinate dalla fisica e non dalla cultura, e quindi saranno le stesse in tutto il mondo; tuttavia è da tenere in considerazione che esistono ambienti diversi e che quindi i sensi degli individui possono essere sottoposti a regolarità ambientali diverse. La seconda tipologia, detta *strutturale*, avviene a causa di connessioni neurali presenti alla nascita (Mondloch & Maurer, 2004; vedi anche Marks, 1978, 1987a; Wagner & Dobkins, 2009). Tali corrispondenze strutturali possono verificarsi anche tra coppie di dimensioni protetiche (cioè correlate alla grandezza) come volume e dimensioni (vedi LB Smith & Sera, 1992), dato che la grandezza (a prescindere dalla particolare dimensione considerata) sembra essere rappresentata allo stesso modo dal cervello (vedi Walsh, 2003). La terza tipologia, detta *semantica*, avviene quando i termini che le persone usano per descrivere le dimensioni degli stimoli si sovrappongono; ad esempio, la terminologia “basso/alto” può essere usata per descrivere sia l’elevazione di uno stimolo visivo, sia il tono acustico (vedi Gallace & Spence, 2006; Martino & Marks, 1999; Melara, 1989b; Mudd, 1963). Queste tipologie sono state riassunte nella tabella 2. Da tenere in considerazione è che negli studi di classificazione rapida possono anche non risultare prove di un’associazione cross-modale, ma per differenze individuali nella direzione delle associazioni; ad esempio, da uno studio (Marks, 1974) è risultato che circa metà della popolazione testata abbinava i suoni forti a una superficie grigia più scura, mentre l’altra metà a una superficie grigia chiara.

Tipi di associazioni cross-modali	Esempi	Corso temporale e spiegazione	Conseguenze
Strutturale	Volume-luminosità	Tendenzialmente innato ma può anche dipendere dalla maturazione delle strutture neurali per la codifica dello stimolo	Percettive e decisionali
Statistica	Tono acustico-elevazione Tono acustico-taglia Volume-dimensione	Apprendimento: accoppiamento stabilito sulla base dell'esperienza con le regolarità dell'ambiente	Percettive e decisionali
Semantica	Tono acustico-elevazione Tono acustico-frequenza	Apprendimento: emergono in seguito allo sviluppo del linguaggio poiché alcuni termini vengono associati a più di un continuum percettivo	Principalmente decisionali

(Tabella 2) Riepilogo delle principali tipologie di associazione cross-modale (Adattato da Spence, 2011).

1.6 Conseguenze sull'integrazione/percezione multi-sensoriale

Vi sono stati vari studi per indagare se le associazioni cross-modali influenzano l'integrazione multisensoriale a livello percettivo utilizzando compiti in cui può essere più facilmente esclusa la spiegazione a livello decisionale.

In uno studio (JO Miller, 1991, esperimento 1) i partecipanti dovevano dare una risposta rapida in un compito *go/no-go*, dove gli stimoli potevano essere presentati in modo unimodale, bimodale congruente o bimodale incongruente. Gli stimoli target erano degli stimoli visivi presentati sopra o sotto il punto di fissazione e dei suoni acuti o gravi. Bisognava astenersi dalla risposta quando uno stimolo visivo era presentato al centro o quando veniva presentato un suono di tono intermedio. Dato che i partecipanti dovevano rispondere rapidamente tramite lo stesso pulsante indipendentemente dal tipo di obiettivo, la ridondanza a livello di selezione della risposta potrebbe essere esclusa come spiegazione di eventuali effetti di corrispondenza cross-modali osservati. I risultati hanno mostrato che i partecipanti hanno risposto più rapidamente con gli stimoli bimodali congruenti rispetto alla condizione incongruente. I dati riguardanti i tempi di risposta contestavano che i due stimoli fossero elaborati in modo indipendente, suggerendo invece una forma di integrazione multi-sensoriale dei segnali target uditivi e visivi.

Per quanto riguarda invece studi attraverso compiti di classificazione non-rapida, in una ricerca (Parise & Spence, 2009) è stato dimostrato che le associazioni cross-modali possono modulare l'integrazione spazio-temporale audiovisiva. In un compito sull'ordine temporale TOJ (*Temporal Order Judgment*) partecipanti dovevano discriminare (con un giudizio non rapido) se uno stimolo uditivo o visivo venisse presentato per primo o per secondo. Questi stimoli visivi e uditivi potevano essere congruenti o incongruenti. L'ipotesi era che se le associazioni modulano davvero l'integrazione audio-visiva a livello percettivo, allora sarebbe stato più difficile distinguere quale stimolo era presentato per primo nelle prove cross-modali congruenti rispetto a quelle incongruenti. I dati furono concordi con questa ipotesi, confermando che la congruenza cross-modale modula la percezione temporale audio-visiva in un compito sull'ordine temporale TOJ. In un altro studio degli stessi autori (Parise & Spence, 2008a) è stato dimostrato che le corrispondenze cross-modali audio-visive modulano anche aspetti spaziali, non solo temporali. Altrove (ad esempio: Maeda et al. 2004) è stato dimostrato che le associazioni cross-modali possono modulare la percezione della direzione di movimento di stimoli in cui questa è ambigua.

Questi sono alcuni esempi di ricerche che dimostrano che le associazioni cross-modali modulano realmente l'integrazione/percezione sensoriale, influenzando le prestazioni degli individui non solo a livello decisionale; tuttavia, non è detto che questo valga per compiti o associazioni cross-modali diverse da quelle testate fino ad ora.

1.7 La relazione tra associazioni cross-modali e la sinestesia

Le *corrispondenze cross-modali* e le *corrispondenze sinestetiche* non sono lo stesso concetto, in quanto non vi è una relazione significativa tra le corrispondenze cross-modali nelle persone "normali" e le corrispondenze sinestetiche nei veri e propri sinesteti (Cytowic & Eagleman, 2009). Tuttavia, condividono tra di loro molte somiglianze, suggerendo anche che possono fare affidamento su molti degli stessi meccanismi neurali sottostanti (Martino & Marks, 2001; Marks, 1989a). Oggi molti autori sostengono che tutti noi ci troviamo da qualche parte lungo un continuum dal comportamento "normale" (cioè non sinestetico) a quello sinestetico conclamato (ad esempio, Martino & Marks, 2001; Simner et al., 2005; Ward et al., 2006; vedi anche Cohen Kadosh & Henik, 2007; Rader & Tellegen, 1987). Tra le ragioni che ci fanno pensare a un legame tra sinestesia e le associazioni cross-modali dei non sinesteti è la sorprendente somiglianza di molte associazioni condivise tra i due gruppi (Marks, 2000); per fare un esempio, entrambi tendono ad associare suoni acuti con percezioni piccole e luminose (Marks, 1974, 1987a; Marks et al., 1987). Tuttavia, se i sinesteti fossero davvero come i non sinesteti, eccetto

per una differenza nella forza delle loro corrispondenze cross-modali, allora ci si potrebbe aspettare di vedere una maggiore integrazione multisensoriale per stimoli congruenti cross-modali nei compiti percettivi e/o una maggiore interferenza nei compiti di classificazione rapida in sinesteti rispetto ai non sinesteti. Tuttavia, attualmente ci sono poche prove a sostegno di tale suggerimento.

Secondo Spence (2011) le corrispondenze cross-modali di tipo strutturale possono essere confrontate con la sinestesia portando a dei risultati proficui; tuttavia, questo non vale per altre tipologie, come ad esempio quella statistica.

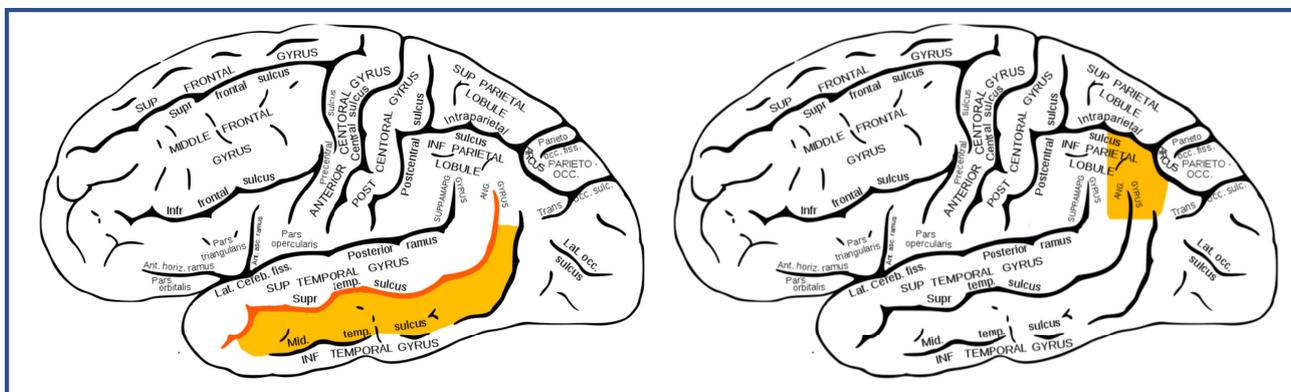
1.8 I sub-strati neurali alla base delle associazioni cross-modali

Dove sono rappresentate le associazioni cross-modali? È stato dimostrato che le aree poli-sensoriali nella corteccia temporale (ad es., il solco temporale superiore e il giro temporale medio) rispondono in modo più vigoroso agli accoppiamenti cross-modali congruenti, rispetto agli accoppiamenti incongruenti, di stimoli di azione dell'oggetto uditivo e visivo presentati simultaneamente (ad es. Beauchamp et al. 2004a; Beauchamp et al. 2004b; Naumer & Kaiser, 2010). Vi sono prove neuropsicologiche preliminari che suggeriscono che il danno al giro angolare (che si trova all'interno della regione temporo-parieto-occipitale) può interferire con la capacità di una persona di abbinare gli stimoli in modo cross-modale, come valutato dal test bouba/kiki (vedi Ramachandran & Hubbard, 2003) (Figura 2). Anche nel disturbo dello spettro autistico sembra scomparire l'effetto bouba/kiki (Oberman & Ramachandran, 2008; Ramachandran & Obermann, 2006). Se confermati, tali risultati potrebbero essere presi per suggerire che le corrispondenze cross-modali, almeno quelle che coinvolgono il simbolismo sonoro, possono verificarsi a un livello piuttosto elevato (vedi anche Evans & Treisman, 2010; Nahm et al., 1993; Westbury, 2005).

Quali cambiamenti neurali sono associati alla creazione di nuove corrispondenze cross-modali? Diversi studi recenti hanno documentato cambiamenti nell'attività neurale quando due stimoli inizialmente non correlati (uno uditivo, l'altro visivo) vengono associati in modo affidabile nella mente di un osservatore (es. Baier, Kleinschmidt, & Müller, 2006; Zangenehpour & Zatorre, 2010). Questi cambiamenti sono stati osservati dopo periodi di esposizione sorprendentemente brevi (Un'esposizione di meno di 45 minuti nello studio di Zangenehpour e Zatorre (2010) ha prodotto effetti che erano ancora presenti il giorno dopo). Nello studio di Baier et al. (2006), ai partecipanti sono stati presentati oggetti e i loro suoni caratteristici. Prima di ogni coppia di stimoli, hanno ricevuto un segnale che indicava se dovevano rispondere alla componente uditiva o visiva del bersaglio. Sono stati osservati cambiamenti significativi nell'attività neurale preparatoria indotta da segnali.

Prima dell'allenamento, la presentazione del segnale ha determinato un'attività potenziata nel sistema sensoriale rilevante per il compito, mentre è stata osservata la soppressione nell'altra corteccia sensoriale irrilevante per il compito (e nel talamo associato). Però, entrambe le modalità sono state migliorate durante il periodo di attivazione, indipendentemente dalla modalità target che risultava essere rilevante per il compito. Tali risultati supportano l'idea che potrebbe esserci una maggiore diffusione dell'attenzione tra le caratteristiche dello stimolo che condividono una qualche forma di corrispondenza cross-modale o associazione appresa (vedi anche Fiebelkorn, Foxe & Molholm, 2010).

Le prove che emergono dagli studi di neuro-imaging pubblicati fino ad oggi supportano quindi l'idea che la creazione di nuove associazioni apprese tra stimoli uditivi e visivi (presumibilmente modellati da un precedente apprendimento associativo) si traduca in una maggiore connettività cross-modale (Zangenehpour & Zatorre, 2010). Di conseguenza, una componente unimodale di una coppia multisensoriale è sufficiente per attivare l'associazione che rappresenta l'altra componente unimodale. Ci si può aspettare che tali cambiamenti funzionali, a loro volta, facilitino sia la percezione multisensoriale che l'integrazione multisensoriale, oltre a supportare la diffusione dell'attenzione e il miglioramento della memoria (vedi Fiebelkorn et al., 2010; Murray et al., 2004; EL Smith et al., 2007).



(Figura 2) A sinistra sono rappresentati il giro temporale medio (giallo) e il solco temporale superiore (arancione). A destra è invece rappresentato il giro angolare (giallo).

1.9 Esempi di studi in animali non umani

È interessante notare che anche gli animali non umani mostrano di possedere corrispondenze cross-modali simili agli umani. Gli scimpanzé rispondono meglio agli stimoli visivi di alta luminanza (quadrati bianchi) quando questi sono presentati insieme a suoni acuti, e a stimoli di bassa luminanza (quadrati neri) presentati insieme a suoni a suoni gravi (Ludwig et al., 2011). Le scimmie Rhesus associano oggetti più vicini a loro con suoni più alti e oggetti più lontani con suoni più bassi (Ghazanfar & Maier, 2009). È stato dimostrato che i cani si affidano alle corrispondenze crossmodali audiovisive, associando toni uditivi alti a stimoli visivi spazialmente elevati e toni uditivi bassi a stimoli situati in una posizione spaziale inferiore (Korzeniowska et al., 2019).

Questi studi suggeriscono che specie diverse condividono meccanismi analoghi per percepire e rappresentare le proprietà fisiche degli oggetti, secondo alcune regole comuni. Tuttavia, le prove esistenti sono limitate alle specie di mammiferi e non hanno ancora chiarito l'origine dello sviluppo di tale meccanismo. Se fosse solo una caratteristica dei mammiferi significherebbe che è un meccanismo insorto per rispondere ad una specifica esigenza di questa classe. Altrimenti, se è adattivo per tutti quelli che devono avere a che fare con la i vari stimoli multimodali e unimodali dell'ambiente possiamo immaginare che sia presente anche in altre classi.

1.10 Perché il pulcino di pollo domestico *Gallus gallus*?

Il pulcino domestico (*Gallus gallus*), in quanto specie a prole atta, è un ottimo modello per lo studio delle abilità precoci (Marino, 2017), quindi utile per indagare l'emergere e lo sviluppo le corrispondenze cross-modali. Inoltre fornisce spunti da una specie filogeneticamente remota, dato che finora la quasi totalità degli studi ha indagato le associazioni cross-modali nei mammiferi (vedi paragrafo 1.9). Infatti la storia evolutiva dei mammiferi si separa da quella degli uccelli circa 300 milioni di anni fa (Emery & Clayton, 2005; Jarvis et al., 2005), durante il periodo Carbonifero, quando dagli amnioti basali derivarono il gruppo dei *sinapsidi* (da cui derivarono i mammiferi) e il gruppo dei *sauropsidi* (da cui derivarono gli uccelli e i rettili attuali).

Nei pulcini esistono già prove della capacità di creare spontaneamente rappresentazioni integrate di informazioni multimodali (Cozzutti & Vallortigara, 2001), e della presenza dell'effetto SNARC (Rugani et al., 2015). Questo effetto è stato spiegato in termini di un'associazione predisposta di numeri e posizione spaziale, che è rappresentata in una linea mentale orientata da sinistra a destra e potrebbe derivare da una dominanza emisferica destra per compiti sia visuo-spaziali e numerici. Al momento sembra esserci un solo studio pubblicato sull'associazione cross-modale in un non-mammifero (Loconsole,

2021). In questo studio si è testato, nel pulcino di pollo domestico (*Gallus gallus*), l'associazione cross-modale spazio-luminanza a 3 giorni di vita. Come negli umani, è stata trovata una preferenza per il lato sinistro con stimoli a bassa luminanza (colore nero) e il lato destro per stimoli ad alta luminanza (colore bianco); al contrario del gruppo di controllo, testato con stimoli neutri (colore grigio), che non ha mostrato preferenze spaziali. Il presente studio, ha usato nuovamente come modello animale il pulcino di pollo domestico, ma, a differenza dello studio sopra citato, l'associazione cross-modale testata è tra tono acustico (suono grave contro acuto) e luminanza (colore nero contro bianco).

2 Materiali e metodi

2.1 Soggetti e condizioni di allevamento

Le uova fecondate di pollo domestico *Gallus gallus* sono state fornite da un incubatoio locale (Incubatoio La Pellegrina, San Pietro in Gù, PD, IT) e incubate (FIEM, MG 70/100 FAMILY) in laboratorio a temperatura (37,5°C) e umidità (50%) controllate. Al momento della schiusa i pulcini sono stati divisi in maschi e femmine tramite sessaggio dell'ala e sono stati selezionati i maschi (N = 57), che sono stati alloggiati a coppie in gabbie metalliche standard (28 x 32 x 40 cm), illuminate da lampade fluorescenti (36W, 15 cm sopra la gabbia). Si è deciso di utilizzare solo soggetti maschi, per ridurre al minimo il rischio di scartare soggetti, per l'eventuale mancanza di motivazione nel rispondere al test, dato che la letteratura suggerisce che i pulcini maschi sono solitamente più motivati delle femmine a lavorare per una ricompensa alimentare (Vallortigara et al. 1990; Workman & Andrew, 1989). I soggetti sono stati assegnati in modo casuale al controllo (N = 17) o alla condizione sperimentale (N = 40). Le gabbie sono state illuminate con un periodo di luce dalle 7:00 alle 19:00 e seguivano degli intervalli di 2/3 ore di alternanza buio-luce dalle 19:00 alle 7:00. I soggetti avevano libero accesso all'acqua e al mangime nella gabbia, inoltre venivano quotidianamente nutriti con tarme della farina (larve di *Tenebrio molitor*) come nutrizione supplementare. Dato che le tarme sono state utilizzate anche come ricompensa alimentare durante i test, i soggetti che si rifiutavano di mangiarli durante l'allevamento sono stati scartati dallo studio. L'intero test è stato videoregistrato da una fotocamera (Canon Legria HF R606) posta a circa 30 cm sopra l'arena, consentendo lo scoring off-line. Al termine delle procedure sperimentali, i soggetti sono stati donati agli allevatori locali.

L'arena sperimentale è di forma triangolare (76 cm di lato x 32 cm di altezza) realizzata in plastica e rivestita di fogli di carta adesiva grigia. In uno degli angoli dell'arena, una parete di vetro rimovibile ha creato l'area di partenza in cui il pulcino era confinato prima dell'inizio di ogni prova. Di fronte al punto di partenza, una barriera verticale (25 x 37 cm) divideva in due aree separate il lato opposto dell'area (Figura 3).

Il training e il test si sono svolti il terzo o quarto giorno di vita. Un'ora prima dell'inizio della procedura sperimentale, i soggetti sono stati privati del cibo, al fine di mantenere un livello ottimale di motivazione alla ricompensa alimentare. L'acqua è invece rimasta sempre disponibile. Tutte le procedure sono conformi al Regolamento italiano ed europeo sugli studi sugli animali e sono state approvate dal Ministero della Salute italiano (autorizzazione n. 196/2017-PR rilasciata il 24/02/2017).

2.2 Training

Il training è stato eseguito posizionando verticalmente un pannello grigio, al centro dell'arena, di fronte al punto di partenza del soggetto. Dietro al pannello veniva posta una larva come ricompensa alimentare che costituiva il rinforzo positivo quando il soggetto andava dietro al pannello. Quest'ultimo costituiva uno stimolo neutro in quanto il soggetto non poteva associare la ricompensa alla posizione spaziale destra/sinistra (dato che era posto al centro) o alla luminanza del colore bianco/nero (dato che era grigio). Il soggetto veniva poi posto nell'area di partenza, inizialmente senza la parete di vetro rimovibile, e lasciato libero di esplorare fino al ritrovamento della larva. Se il soggetto non riusciva a trovarla in un paio di minuti, veniva indirizzato verso di essa tramite le pinzette con cui era stato abituato a riceverle quotidianamente in gabbia. Una volta che il soggetto aveva recuperato e mangiato la larva, questo veniva tolto dall'arena, si riposizionava una nuova larva dietro al pannello e si ripeteva l'intero processo più volte fino a che il soggetto non imparava ad aggirare immediatamente il pannello centrale appena lasciato libero di muoversi nell'arena. Successivamente venivano ripetuti i passaggi aggiungendo la parete di vetro e sostituendo il pannello grigio con un pannello bianco o uno nero, alternando questi due colori tra una prova e l'altra in modo da non rinforzare uno dei due colori di più rispetto all'altro. Il training è stato ripetuto con questi cambiamenti perché era necessario che il soggetto si riabituasse agli stimoli sconosciuti. In seguito veniva eseguita di nuovo la prova con il pannello grigio ma con l'aggiunta di due suoni della durata di pochi secondi che venivano alternati, uno grave e uno acuto. Questo serviva ad abituare il soggetto anche alla presenza dei suoni ma senza creare in lui un'associazione tono acustico/luminanza dovuta all'apprendimento. Una volta completato questo processo, il training era concluso e si passava al test effettivo.



(Figura 3) Apparato sperimentale con le tre condizioni di luminanza dello stimolo: neutra, alta luminanza e bassa luminanza.

2.3 Test

Il disegno sperimentale è entro i soggetti, quindi ogni soggetto è sottoposto a entrambi i livelli della variabile indipendente, ovvero suono grave e suono acuto. Il paradigma usato è una scelta spontanea tra i due livelli della variabile dipendente, ovvero bassa luminanza (pannello nero) o alta luminanza (pannello bianco) (Figura 4). Ogni soggetto è sottoposto a 20 prove, 10 con suono acuto e 10 con suono grave. Dei 40 soggetti della condizione sperimentale: una metà inizierà le prime 10 con il suono acuto per poi continuare le altre 10 con il suono grave; viceversa invece per l'altra metà del campione. Durante le prove, per ridurre l'influenza di eventuali bias spaziali, i 2 pannelli vengono scambiati tra destra e sinistra in modo pseudo-casuale (I pannelli non venivano mai presentati nella stessa posizione per più di 2 prove consecutive, inoltre ogni pannello veniva presentato a destra e sinistra lo stesso numero di volte). La misurazione consisteva nel registrare per ogni prova il colore scelto dal soggetto, per poi verificare se la scelta è influenzata dalla tonalità del suono.

La condizione di controllo consisteva sempre in 10 prove con un suono e 10 prove con l'altro suono, ma la scelta spontanea tra due pannelli grigi (condizione neutra), per poter tenere conto di eventuali bias spaziali (Figura 5). Le caratteristiche dell'esperimento sono ricapitolate in tabella 3.



(Figura 4) Scelta binaria della fase test tra le due condizioni di bassa e alta luminanza, invertendo la posizione spaziale tra destra e sinistra in modo pseudo-casuale nel corso delle prove.



(Figura 5) Condizione di controllo con due pannelli grigi.

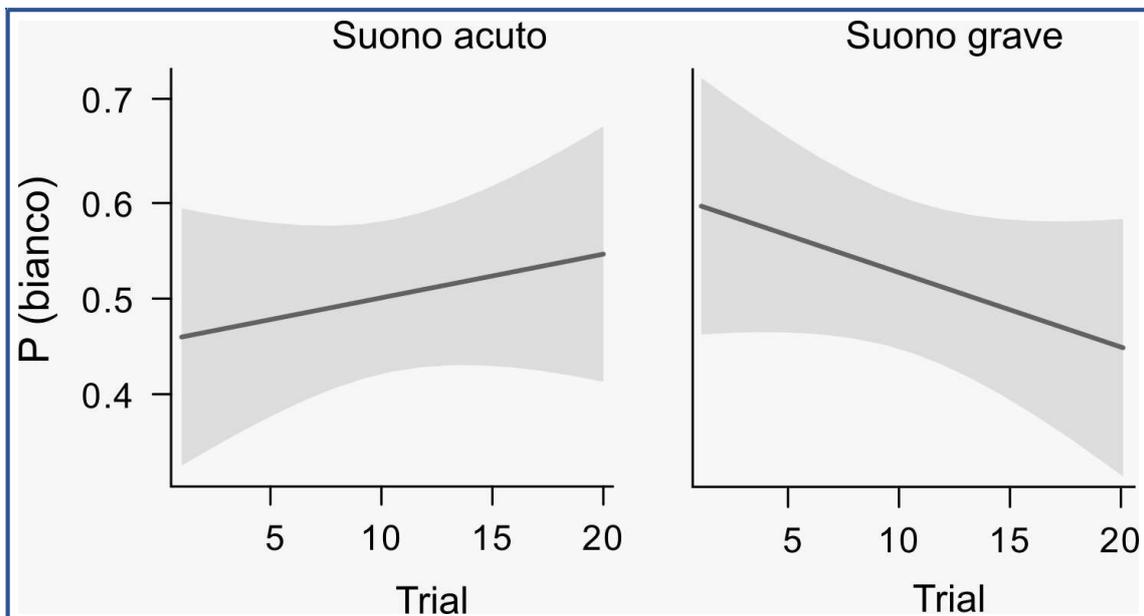
(Tabella 3) Tabella riassuntiva delle caratteristiche tecniche dell'esperimento.

Disegno sperimentale	Entro i soggetti
Paradigma	Scelta spontanea
Variabile indipendente	Tonalità del suono (dicotomica: acuto/grave)
Variabile dipendente	Luminanza (dicotomica: alta/bassa)
Campione sperimentale	40 soggetti
Campione di controllo	17 soggetti

3 Analisi dei dati e risultati

3.1 Analisi dei dati

I dati sono stati analizzati in R (R 4.0.2) 2013) (R core team, 2019). La variabile dipendente (colore del pannello scelto) è stata codificata come dicotomica, per cui è stato utilizzato un modello lineare generalizzato con una struttura binomiale (pacchetto lme4; Bates et al. 2015). Nel caso del gruppo di controllo, la variabile dipendente era la posizione del pannello scelto dal pulcino (destra o sinistra), mentre nel caso del gruppo sperimentale il colore del pannello scelto (bianco o nero). In entrambi i casi, le variabili indipendenti incluse nel modello sono state il suono (acuto o grave), il numero di prove (da 1 a 20) e l'interazione tra queste due variabili. I soggetti sono stati inclusi come effetto randomico. È stata successivamente svolta un'analisi post hoc per determinare la direzione dell'effetto dei predittori, utilizzando il pacchetto emmeans (Lenth, 2020).



(Figura 6) Il grafico mostra attraverso una retta di regressione lineare come la probabilità di scegliere il bianco (P) aumenti leggermente nel corso delle 20 prove (Trial) con il suono acuto, mentre diminuisce con il suono grave. L'area grigia rappresenta l'intervallo di confidenza.

3.2 Risultati

Per quanto riguarda il gruppo di controllo, non è stato riscontrato alcun effetto del suono ($X^2 = 0.014$, $p = 0.906$), del trial ($X^2 = 2.82$, $p = 0.093$), né della loro interazione ($X^2 = 0.008$, $p = 0.927$). L'analisi post hoc mostra infatti come in entrambi i casi (ovvero sia con il suono acuto che con il suono grave) i pulcini tendono a scegliere casualmente tra i due

pannelli nel corso dell'intero test (suono acuto: $tendenza(dx) = 0.034$, $SE = 0.042$, $z = 0.797$, $p = 0.426$; suono grave: $tendenza(dx) = 0.04$, $SE = 0.043$, $z = 0.949$, $p = 0.343$).

Per quanto riguarda il gruppo sperimentale, similmente a quanto riportato per il gruppo di controllo, non è stato riscontrato alcun effetto del suono ($X^2 = 0.272$, $p = 0.602$), del *trial* ($X^2 = 0.245$, $p = 0.621$), né della loro interazione ($X^2 = 1.637$, $p = 0.201$). Tuttavia, nell'analisi post hoc è possibile osservare una tendenza, seppur non significativa, per cui all'aumentare delle prove, i pulcini tendono a scegliere maggiormente il pannello bianco in presenza del suono acuto ($tendenza(bianco) = 0.0185$, $SE = 0.024$, $z = 0.786$, $p = 0.432$) e il pannello nero in presenza del suono grave ($tendenza(bianco) = -0.032$, $SE = 0.024$, $z = -1.339$, $p = 0.181$) (Figura 6). Va comunque ricordato che i dati non sono statisticamente significativi e che la tendenza osservata è puramente qualitativa.

4 Discussione

4.1 Confronto con altri studi

Lo scopo del presente studio era di indagare la presenza di una associazione cross-modale tra frequenza sonora e luminanza nei pulcini di pollo domestici a pochi giorni di vita (3-4 giorni). Nonostante i dati non forniscano evidenze conclusive circa tale meccanismo, è comunque possibile fare alcune riflessioni a riguardo, basandosi anche su un'osservazione qualitativa o puramente descrittiva dei risultati e su altri studi condotti in laboratorio per indagare lo stesso fenomeno.

In un precedente lavoro (in stampa) svolto nello stesso laboratorio è stato adoperato il medesimo paradigma impiegato in questo studio nella condizione sperimentale, ma, oltre alla posizione destra/sinistra tra gli stimoli ad alta e bassa luminanza, veniva randomizzata anche l'alternanza suono acuto/grave tra una prova e l'altra. Ovvero, invece di presentare gli stimoli uditivi in blocco come nel presente studio (10 prove consecutive con suono acuto e 10 prove consecutive con suono grave), ciascuna prova poteva essere svolta con suono acuto o grave alternati in maniera semi-randomica (ovvero lo stesso suono non compariva più di due volte consecutive). I risultati di questo primo studio hanno mostrato una tendenza ma non significativa a preferire il bianco quando veniva presentato il suono acuto e viceversa.

Una possibile spiegazione per il risultato ottenuto è stata che, nonostante vi sia una tendenza ad associare suono e luminanza in maniera cross-modale, il carico cognitivo richiesto dal compito fosse eccessivo per i pulcini, risultando quindi in una scelta casuale al compito. Il presente studio è stato disegnato per testare questa ipotesi, verificando se risultasse la presenza di questa associazione cross-modale alleggerendo il carico cognitivo dei soggetti, presentando gli stimoli uditivi in blocchi. Tuttavia, anche in questo caso, nonostante fosse possibile osservare una tendenza nella direzione attesa, questa non è risultata statisticamente significativa.

Nei due studi analizzati finora, il paradigma sperimentale era tale da permettere lo studio di un'associazione spontanea tra frequenza sonora e luminanza. In un terzo studio (in stampa), sempre nello stesso laboratorio, è stato invece adottato un paradigma che prevedeva di addestrare i pulcini ad associare le due dimensioni. Nello specifico, ciascun pulcino veniva addestrato a beccare una scatola (nera o bianca) per ottenere una ricompensa alimentare (un pezzo di tarma della farina) fino al raggiungimento di un criterio di apprendimento (17 prove corrette su 20). La posizione delle scatole veniva alternata in modo pseudo-casuale come nei due studi precedenti. Il giorno successivo, dopo aver raggiunto il criterio per completare la prima fase di acquisizione, i pulcini venivano

sottoposti ad una seconda fase (*reversal*) in cui per ottenere la ricompensa dovevano produrre la risposta opposta a quella precedentemente imparata, ovvero, se in acquisizione erano stati addestrati a scegliere il bianco, allora nel *reversal* venivano addestrati a scegliere il nero con la stessa procedura. Quando avveniva la scelta corretta, veniva fatto ascoltare un suono (acuto o grave), mentre quando il soggetto sbagliava il colore della scatola, veniva fatto ascoltare il suono opposto. In questo modo veniva associato sperimentalmente/artificialmente una determinata frequenza sonora a una determinata luminanza, creando 4 condizioni sperimentali, 2 congruenti che diventavano incongruenti nel *reversal* (Bianco-acuto che diventava nero-acuto e nero-grave che diventava bianco-grave) e 2 incongruenti che diventavano congruenti nel *reversal* (Bianco-grave che diventava nero-grave e nero-acuto che diventava bianco acuto). L'idea di base era che, verificando se i soggetti trovano più semplice passare dalla condizione incongruente a quella congruente e trovano più difficile fare l'opposto, allora vi è una tendenza naturale a quel determinato tipo di associazione (cioè bianco-acuto e nero-grave, invece che bianco-grave e nero-acuto). I risultati mostrano che sia nell'acquisizione congruente che nel *reversal* congruente sembrano avere prestazioni lievemente migliori rispetto a quella incongruente ma, anche in questo caso, in modo non significativo.

Dati i risultati di questi studi, il problema, per cui nel primo studio non è risultata l'associazione, non sembra essere dovuto al carico cognitivo troppo impegnativo per i soggetti (studio 2), né un problema di forza dell'associazione, ovvero spontanea contro appresa (studio 3). Per quale motivo quindi si vede una tendenza a livello descrittivo ma non statistico? Un motivo potrebbe essere la natura dell'associazione descritta nel prossimo paragrafo.

4.2 Associazione strutturale o statistica?

Un motivo per cui l'associazione spazio-luminanza è risultata significativa (Loconsole, 2021) potrebbe essere che questa associazione è di tipo strutturale, mentre l'associazione frequenza sonora-luminanza non è risultata significativa perché potrebbe essere di tipo statistico e i 3-4 giorni di vita dei soggetti, stabulati tra l'altro in condizioni abbastanza controllate, potrebbero non essere bastati a fare abbastanza esperienza di queste regolarità statistiche presenti nell'ambiente, e questa esperienza limitata/parziale potrebbe spiegare la tendenza non significativa. Un'alternativa è che abbiano fatto un'abbondante esperienza di suoni acuti associati a alta luminanza essendo che ogni soggetto era stabulato con un suo conspecifico (associando quindi il pigolio acuto al colore giallo ad alta luminanza), senza tuttavia fare abbastanza esperienza di suoni gravi legati a oggetti a bassa luminanza, riducendo così il fenomeno dell'associazione cross-modale. Questa

questione potrebbe essere chiarita in futuro testando se la tendenza cresce nel corso dello sviluppo del soggetto, fino a diventare statisticamente significativa; oppure allevando i soggetti in ambienti più arricchiti con diversi stimoli.

4.3 Filogenesi del meccanismo

Per chiarire la questione sull'origine filogenetica saranno utili in futuro nuovi studi per verificare la presenza di associazioni cross-modali negli uccelli, sia testando nuovamente nel pulcino di pollo domestico associazioni cross-modali diverse dalle due testate finora, sia verificandone la presenza delle stesse associazioni cross-modali in altre specie di uccelli. Raccogliendo abbastanza prove empiriche della loro presenza negli uccelli si può ipotizzare un'origine del meccanismo comune con i mammiferi, ovvero circa 300 milioni di anni fa (Emery & Clayton, 2005; Jarvis et al., 2005). Un'alternativa è che potrebbe essersi evoluto separatamente nei due gruppi per convergenza evolutiva dovuta a simili pressioni selettive dello stesso ambiente (Güntürkün, 2012), beneficiando entrambi i gruppi di un meccanismo a basso costo per un'elaborazione più rapida.

Tuttavia, essendo un meccanismo legato alla percezione multisensoriale, si può ipotizzare sia filogeneticamente antico tanto quanto la percezione multisensoriale stessa, ovvero risalente all'origine della centralizzazione del sistema nervoso (Per l'evoluzione della centralizzazione del sistema nervoso vedi: D. Arendt et al. 2008), andando quindi molto più indietro nel tempo rispetto la divisione uccelli-mammiferi. Questo aspetto può essere testato studiando la presenza di associazioni cross-modali in specie di origine più primitiva (ad esempio: rettili, anfibi, pesci, e risalendo fino agli invertebrati marini).

Se davvero si trovassero prove di associazione cross-modale in animali pre-corticali, sembrerebbe che questa funzione non avvenga ad un livello così elevato come crediamo, o quanto meno potrebbe essersi evoluta a un livello relativamente basso per poi spostarsi nel corso dell'evoluzione a livello della corteccia, in modo da integrarsi più "comodamente" con altre funzioni di livello superiore.

4.4 Conclusioni

Il presente studio non è riuscito a definire in modo chiaro la presenza o assenza dell'associazione cross-modale tra frequenza sonora e luminanza nel pulcino di pollo domestico (*Gallus gallus*) a 3-4 giorni di vita. Uno studio (Loconsole, 2021) sembra dimostrare l'associazione tra spazio e luminanza, tuttavia serviranno altri studi per accertare che il fenomeno dell'associazione cross-modale sia effettivamente presente nel gruppo degli uccelli, in modo da dare indicazioni della sua origine filogenetica, se antecedente o successiva alla divisione uccelli-mammiferi. Vi sono buoni motivi per ipotizzare a un'origine anche molto più primitiva rispetto a questa divisione, questione che dovrà anch'essa essere messa alla prova da futuri studi.

Bibliografia

- Arendt, D., Denes, A. S., Jékely, G., & Tessmar-Raible, K. (2008). The evolution of nervous system centralization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 1523-1528.
- Baier, B., Kleinschmidt, A., & Müller, N. (2006). Cross-modal processing in early visual and auditory cortices depends on the statistical relation of multisensory information. *The Journal of Neuroscience*, 26, 12260–12265.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1–48.
- Beauchamp, M. S., Argall, B. D., Bodurka, J., Duyn, J. H., & Martin, A. (2004a). Unraveling multisensory integration: Patchy organization within human STS multisensory cortex. *Nature Neuroscience*, 7, 1190–1192.
- Beauchamp, M. S., Lee, K. E., Argall, B. D., & Martin, A. (2004b). Integration of auditory and visual information about objects in superior temporal sulcus. *Neuron*, 41, 809–823.
- Bernstein, I. H., Eason, T. R., & Schurman, D. L. (1971). Hue–tone interaction: A negative result. *Perceptual and Motor Skills*, 33, 1327–1330.
- Bernstein, I. H., & Edelstein, B. A. (1971). Effects of some variations in auditory input upon visual choice reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 87, 241–247.
- Bertelson, P., Vroomen, J., Wiegeraad, G., & de Gelder, B. (1994). Exploring the relation between McGurk interference and ventriloquism. *Proceedings of the 1994 International Conference on Spoken Language Processing*, 2, 559–562.
- Boernstein, W. S. (1936). On the functional relations of the sense organs to one another and to the organism as a whole. *The Journal of General Psychology*, 15, 117–131.
- Boernstein, W. S. (1970). Perceiving and thinking: Their interrelationship and organismic organization. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 169, 673–682.
- Bozzi, P., & Flores D'Arcais, G. (1967). Ricerca sperimentale sui rapporti intermodali fra qualità espressive [Experimental research on the intermodal relationships between expressive qualities]. *Archivio di Psicologia, Neurologia e Psichiatria*, 28, 377–420.
- Braaten, R. (1993). Synesthetic correspondence between visual location and auditory pitch in infants. *Paper presented at the 34th Annual Meeting of the Psychonomic Society*.
- Bronner, K. (2011). *What is the sound of citrus? Research on the correspondences between the perception of sound and taste/flavour*.
- Bronner, K., Bruhn, H., Hirt, R., & Piper, D. (2008). *Research on the interaction between the perception of music and flavour*. Poster presented at the 9th Annual Meeting of the International Multisensory Research Forum (IMRF), Hamburg, Germany, July.
- Chen, Y.-C., & Spence, C. (2010). When hearing the bark helps to identify the dog: Semantically-congruent sounds modulate the identification of masked pictures. *Cognition*, 114, 389–404.
- Cohen Kadosh, R., & Henik, A. (2007). Can synaesthesia research inform cognitive science? *Trends in Cognitive Sciences*, 11, 177–184.
- Collier, G. L. (1996). Affective synaesthesia: Extracting emotion space from simple perceptual stimuli. *Motivation and Emotion*, 20, 1–32.

- Cowan, N., & Barron, A. (1987). Cross-modal, auditory–visual Stroop interference and possible implications for speech memory. *Perception & Psychophysics*, 41, 393–401.
- Cowles, J. T. (1935). An experimental study of the pairing of certain auditory and visual stimuli. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 461–469.
- Cozzutti, C., & Vallortigara, G. (2001). Hemispheric memories for the content and position of food caches in the domestic chick. *Behavioral Neuroscience*, 115, 305–313.
- Crisinel, A.-S., & Spence, C. (2009). Implicit association between basic tastes and pitch. *Neuroscience Letters*, 464, 39–42.
- Crisinel, A.-S., & Spence, C. (2010a). As bitter as a trombone: Synesthetic correspondences in nonsynesthetes between tastes/flavors and musical notes. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72, 1994–2002.
- Crisinel, A.-S., & Spence, C. (2010b). A sweet sound? Exploring implicit associations between basic tastes and pitch. *Perception*, 39, 417–425.
- Cytowic, R. E. (1993). *The man who tasted shapes*. New York: G. P. Putnam's Sons.
- Cytowic, R. E., & Eagleman, D. M. (2009). *Wednesday is indigo blue: Discovering the brain of synesthesia*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Cytowic, R. E., & Wood, F. B. (1982). Synaesthesia II: Psychophysical relations in the synaesthesia of geometrically shaped taste and colored hearing. *Brain and Cognition*, 1, 36–49.
- Doehrmann, O., & Naumer, M. J. (2008). Semantics and the multisensory brain: How meaning modulates processes of audio-visual integration. *Brain Research*, 1242, 136–150.
- Emery, N. J., & Clayton, N. S. (2005). Evolution of the avian brain and intelligence. *Current Biology: CB*, 15, R946–950.
- Evans, K. K., & Treisman, A. (2010). Natural cross-modal mappings between visual and auditory features. *Journal of Vision*, 10, 6:1–12.
- Fiebelkorn, I. C., Foxe, J. J., & Molholm, S. (2010). Dual mechanisms for the cross-sensory spread of attention: How much do learned associations matter? *Cerebral Cortex*, 20, 109–120.
- Frens, M. A., Van Opstal, A. J., & Van der Willigen, R. F. (1995). Spatial and temporal factors determine audio-visual interactions in human saccadic eye movements. *Perception & Psychophysics*, 57, 802–816.
- Frings, C., & Spence, C. (2010). Crossmodal congruency effects based on stimulus identity. *Brain Research*, 1354, 113–122.
- Gallace, A., & Spence, C. (2006). Multisensory synesthetic interactions in the speeded classification of visual size. *Perception & Psychophysics*, 68, 1191–1203.
- Ghazanfar, A. A., & Maier, J. X. (2009). Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) hear rising frequency sounds as looming. *Behavioral Neuroscience*, 123, 822–827.
- Grassi, M., & Casco, C. (2010). Audiovisual bounce-inducing effect: When sound congruence affects grouping in vision. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72, 378–386.

- Greenwald, A. G., McGhee, D. E., & Schwartz, J. L. K. (1998). Measuring individual differences in implicit cognition: The implicit association test. *Journal of Personality and Social Psychology*, 74, 1464–1480.
- Güntürkün, O. (2012). The convergent evolution of neural substrates for cognition. *Psychological research*, 76, 212-219.
- Guttman, S. E., Gilroy, L. A., & Blake, R. (2005). Hearing what the eyes see: Auditory encoding of visual temporal sequences. *Psychological Science*, 16, 228–235.
- Hartshorne, C. (1934). The philosophy and psychology of sensation. Chicago: *University of Chicago Press*.
- Hein, G., Doehrmann, O., Müller, N. G., Kaiser, J., Muckli, L., & Naumer, M. J. (2007). Object familiarity and semantic congruency modulate responses in cortical audiovisual integration areas. *The Journal of Neuroscience*, 27, 7881–7887.
- Holt-Hansen, K. (1968). Taste and pitch. *Perceptual and Motor Skills*, 27, 59–68.
- Holt-Hansen, K. (1976). Extraordinary experiences during crossmodal perception. *Perceptual and Motor Skills*, 43, 1023–1027.
- Innes-Brown, H., & Crewther, D. (2009). The impact of spatial incongruence on an auditory–visual illusion. *PLoS ONE*, 4, e6450.
- Janković, D. (2010). *Evaluative processing is not sensory modality specific*. Poster presented at the 11th International Multisensory Research Forum meeting, Liverpool, U.K., June.
- Jarvis, E. D., Güntürkün, O., Bruce, L., Csillag, A., Karten, H., Kuenzel, W., Medina, L., Paxinos, G., Perkel, J. D., Shimizu, T., Striedter, G., Wild, J. M., Ball, G. F., Dugas-Ford, J., Durand, S. E., Hough, G. E., Husband, S., Kubikova, L., Lee, D. W., Mello, C. V., Powers, A., Siang, C., Smulders, T. V., Wada, K., White, S. A., Yamamoto, K., Yu, J., Reiner, A., Butler, A. B. (2005). Avian brains and a new understanding of vertebrate brain evolution. *Nature Reviews Neuroscience*, 6, 151–159.
- Jones, J. A., & Jarick, M. (2006). Multisensory integration of speech signals: The relationship between space and time. *Experimental Brain Research*, 174, 588–594.
- Jones, J. A., & Munhall, K. G. (1997). The effects of separating auditory and visual sources on audiovisual integration of speech. *Canadian Acoustics*, 25, 13–19.
- Köhler, W. (1929). *Gestalt psychology*. New York: Liveright.
- Korzeniowska, A. T., Root-Gutteridge, H., Simner, J., & Reby, D. (2019). Audio–visual crossmodal correspondences in domestic dogs (*Canis familiaris*). *Biology Letters*, 15, 20190564.
- Laurienti, P. J., Kraft, R. A., Maldjian, J. A., Burdette, J. H., & Wallace, M. T. (2004). Semantic congruence is a critical factor in multisensory behavioral performance. *Experimental Brain Research*, 158, 405–414.
- Lenth, R. (2020). : *Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means*.
- Lewkowicz, D. J., & Turkewitz, G. (1980). Cross-modal equivalence in early infancy: Auditory–visual intensity matching. *Developmental Psychology*, 16, 597–607.
- Loconsole, M., Pasculli, M. S., & Regolin, L. (2021). Space-luminance crossmodal correspondences in domestic chicks. *Vision Research*, 188, 26-31.

- Ludwig, V. U., Adachi, I., & Matsuzawa, T. (2011). Visuoauditory mappings between high luminance and high pitch are shared by chimpanzees (*Pan troglodytes*) and humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 20661–20665.
- Lyman, B. (1979). Representation of complex emotional and abstract meanings by simple forms. *Perceptual and Motor Skills*, 49, 839–842.
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, 109, 163–203.
- Maeda, F., Kanai, R., & Shimojo, S. (2004). Changing pitch induced visual motion illusion. *Current Biology*, 14, R990–R991.
- Makovac, E., & Gerbino, W. (2010). Sound–shape congruency affects the multisensory response enhancement. *Visual Cognition*, 18, 133–137.
- Marino, L. (2017). Thinking chickens: A review of cognition, emotion, and behavior in the domestic chicken. *Animal Cognition*, 20, 127–147.
- Marks, L. E. (1974). On associations of light and sound: The mediation of brightness, pitch, and loudness. *The American Journal of Psychology*, 87, 173–188.
- Marks, L. (1978). *The unity of the senses: Interrelations among the modalities*. New York: Academic Press.
- Marks, L. E. (1987a). On cross-modal similarity: Auditory–visual interactions in speeded discrimination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, 384–394.
- Marks, L. E. (1987b). On cross-modal similarity: Perceiving temporal patterns by hearing, touch, and vision. *Perception & Psychophysics*, 42, 250–256.
- Marks, L. E. (2000). Synesthesia. In E. Cardeña, S. J. Lynn, & S. C. Krippner (Eds.), *Varieties of anomalous experience: Examining the scientific evidence* (pp. 121–149). Washington: American Psychological Association.
- Marks, L. E., Hammeal, R. J., & Bornstein, M. H. (1987). Perceiving similarity and comprehending metaphor. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 52, 1–102.
- Marks, L. E., Szczesiul, R., & Ohlott, P. (1986). On the cross-modal perception of intensity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12, 517–534.
- Martino, G., & Marks, L. E. (1999). Perceptual and linguistic interactions in speeded classification: Tests of the semantic coding hypothesis. *Perception*, 28, 903–923.
- Martino, G., & Marks, L. E. (2000). Cross-modal interaction between vision and touch: The role of synesthetic correspondence. *Perception*, 29, 745–754.
- Martino, G., & Marks, L. E. (2001). Synesthesia: Strong and weak. *Current Directions in Psychological Science*, 10, 61–65.
- Melara, R. D. (1989b). Similarity relations among synesthetic stimuli and their attributes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 212–231.
- Miller, J. O. (1991). Channel interaction and the redundant targets effect in bimodal divided attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17, 160–169.

- Molholm, S., Ritter, W., Javitt, D. C., & Foxe, J. J. (2004). Multisensory visual–auditory object recognition in humans: A high-density electrical mapping study. *Cerebral Cortex*, 14, 452–465.
- Mondloch, C. J., & Maurer, D. (2004). Do small white balls squeak? Pitch–object correspondences in your children. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 4, 133–136.
- Morgan, G. A., Goodson, F. E., & Jones, T. (1975). Age differences in the associations between felt temperatures and color choices. *The American Journal of Psychology*, 88, 125–130.
- Mudd, S. A. (1963). Spatial stereotypes of four dimensions of pure tone. *Journal of Experimental Psychology*, 66, 347–352.
- Murray, M. M., Michel, C. M., Grave de Peralta, R., Ortigue, S., Brunet, D., Gonzalez Andino, S., & Schnider, A. (2004). Rapid discrimination of visual and multisensory memories revealed by electrical neuroimaging. *Neuroimage*, 21, 125–135.
- Nahm, F. K. D., Tranel, D., Damasio, H., & Damasio, A. R. (1993). Cross-modal associations and the human amygdale. *Neuropsychologia*, 31, 727–744.
- Naumer, M. J., & Kaiser, J. (Eds.). (2010). *Multisensory object perception in the primate brain*. New York: Springer.
- Oberman, L. M., & Ramachandran, V. S. (2008). Preliminary evidence for deficits in multisensory integration in autism spectrum disorders: The mirror neuron hypothesis. *Social Neuroscience*, 3, 348–355.
- Osgood, C., Suci, G., & Tannenbaum, P. (1957). *The measurement of meaning*. Urbana: University of Illinois Press.
- Parise, C., & Spence, C. (2008a). Synesthetic congruency modulates the temporal ventriloquism effect. *Neuroscience Letters*, 442, 257–261.
- Parise, C., & Spence, C. (2008b). *Synesthetic correspondence modulates audiovisual temporal integration*. Poster presented at the 9th IMRF meeting, Hamburg, Germany, July.
- Parise, C., & Spence, C. (2009). “When birds of a feather flock together”: Synesthetic correspondences modulate audiovisual integration in non-synesthetes. *PLoS ONE*, 4, e5664.
- Poffenberger, A. T., & Barrows, B. E. (1924). The feeling value of lines. *The Journal of Applied Psychology*, 8, 187–205.
- Radeau, M., & Bertelson, P. (1987). Auditory–visual interaction and the timing of inputs. Thomas (1941) revisited. *Psychological Research*, 49, 17–22.
- Rader, C. M., & Tellegen, A. (1987). An investigation of synaesthesia. *Journal of Personality and Social Psychology*, 52, 981–987.
- Ramachandran, V. S., & Hubbard, E. M. (2001). Synaesthesia—A window into perception, thought and language. *Journal of Consciousness Studies*, 8, 3–34.
- Ramachandran, V. S., & Hubbard, E. M. (2003, May). Hearing colors, tasting shapes. *Scientific American*, 288, 43–49.
- Ramachandran, V. S., & Oberman, L. M. (2006, May 12). Broken mirrors. *Scientific American*, 295, 62–69.
- R Core Team. (2019). *R: A language and environment for statistical computing*.
- Recanzone, G. H. (2003). Auditory influences on visual temporal rate perception. *Journal of Neurophysiology*, 89, 1078–1093.

- Rudmin, F., & Cappelli, M. (1983). Tone–taste synesthesia: A replication. *Perceptual and Motor Skills*, 56, 118.
- Rugani, R., Vallortigara, G., Priftis, K., & Regolin, L. (2015). Number-space mapping in the newborn chick resembles humans' mental number line. *Science*, 347, 534–536.
- Sapir, E. (1929). A study in phonetic symbolism. *Journal of Experimental Psychology*, 12, 225–239.
- Shore, D. I., Barnes, M. E., & Spence, C. (2006). The temporal evolution of the crossmodal congruency effect. *Neuroscience Letters*, 392, 96–100.
- Simner, J., Cuskey, C., & Kirby, S. (2010). What sound does that taste? Cross-modal mapping across gustation and audition. *Perception*, 39, 553–569.
- Simner, J., & Ludwig, V. (2009). *What colour does that feel? Crossmodal correspondences from touch to colour*. Paper presented at the Third International Conference of Synaesthesia and Art, Granada, Spain, April.
- Simner, J., Ward, J., Lanz, M., Jansari, A., Noonan, K., Glover, L., & Oakley, D. A. (2005). Nonrandom associations of graphemes to colours in synaesthetic and non-synaesthetic populations. *Cognitive Neuropsychology*, 22, 1069–1085.
- Simpson, R. H., Quinn, M., & Ausubel, D. P. (1956). Synaesthesia in children: Association of colors with pure tone frequencies. *The Journal of Genetic Psychology*, 89, 95–103.
- Slutsky, D. A., & Recanzone, G. H. (2001). Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect. *NeuroReport*, 12, 7–10.
- Smith, E. L., Grabowecky, M., & Suzuki, S. (2007). Auditory–visual crossmodal integration in perception of face gender. *Current Biology*, 17, 1680–1685.
- Smith, L. B., & Sera, M. D. (1992). A developmental analysis of the polar structure of dimensions. *Cognitive Psychology*, 24, 99–142.
- Spence, C. (2007). Audiovisual multisensory integration. *Acoustical Science & Technology*, 28, 61–70.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial-verbal reaction. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643–662.
- Thomas, G. J. (1941). Experimental study of the influence of vision on sound localization. *Journal of Experimental Psychology*, 28, 163–177.
- Vallortigara, G., Cailotto, M., & Zanforlin, M. (1990). Sex differences in social reinstatement motivation of the domestic chick (*Gallus gallus*) revealed by runway tests with social and nonsocial reinforcement. *Journal of Comparative Psychology*, 104, 361.
- van Atteveldt, N., Formisano, E., Goebel, R., & Blomert, L. (2004). Integration of letters and speech sounds in the human brain. *Neuron*, 43, 271–282.
- van Wassenhove, V., Grant, K. W., & Poeppel, D. (2007). Temporal window of integration in auditory–visual speech perception. *Neuropsychologia*, 45, 598–607.
- Vatakis, A., Ghazanfar, A., & Spence, C. (2008). Facilitation of multisensory integration by the “unity assumption”: Is speech special? *Journal of Vision*, 8, 14:1–11.
- von Békésy, G. (1959). Similarities between hearing and skin sensations. *Psychological Review*, 66, 1–22.
- Vroomen, J., & Keetels, M. (2006). The spatial constraint in intersensory pairing: No role in temporal ventriloquism. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32, 1063–1071.
- Wagner, K., & Dobkins, K. (2009). Shape–color synaesthesia in the first year of life: A normal stage of visual development? [Abstract]. *Journal of Vision*, 9, 699a.

- Walker, P., & Smith, S. (1985). Stroop interference based on the multimodal correlates of haptic size and auditory pitch. *Perception*, 14, 729–736.
- Walker, R. (1987). The effects of culture, environment, age, and musical training on choices of visual metaphors for sound. *Perception & Psychophysics*, 42, 491–502.
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: Common cortical metrics of time, space and quality. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 483–488.
- Ward, J., Huckstep, B., & Tsakanikos, E. (2006). Sound–colour synaesthesia: To what extent does it use cross-modal mechanisms common to us all? *Cortex*, 42, 264–280.
- Welch, R. B., & Warren, D. H. (1980). Immediate perceptual response to intersensory discrepancy. *Psychological Bulletin*, 3, 638–667.
- Westbury, C. (2005). Implicit sound symbolism in lexical access: Evidence from an interference task. *Brain and Language*, 93, 10–19.
- Workman, L., & Andrew, R. J. (1989). Simultaneous changes in behaviour and in lateralization during the development of male and female domestic chicks. *Animal Behaviour*, 38, 596–605.
- Yau, J. M., Olenczak, J. B., Dammann, J. F., & Bensmaia, S. J. (2009). Temporal frequency channels are linked across audition and touch. *Current Biology*, 19, 561–566.
- Zangenehpour, S., & Zatorre, R. J. (2010). Cross-modal recruitment of primary visual cortex following brief exposure to bimodal audiovisual stimuli. *Neuropsychologia*, 48, 591–600.