

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Filosofia, Sociologia, Pedagogia e
Psicologia Applicata

Corso di Laurea in Scienze Psicologiche, Sociali
e del Lavoro

“The Rhythm of Perception: Entrainment to
Acoustic Rhythms Induces Subsequent
Perceptual Oscillation, Hickok, Farahbod &
Saberri, 2015”: uno studio di replica diretta

Relatore:

Ch.mo Prof. Massimo Grassi

Laureando:

Carlo Megighian

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

INTRODUZIONE	3
IL LEGAME TRA RITMO E PERCEZIONE – L’ <i>ENTRAINMENT</i>	4
DUBBI E QUESTIONI APERTE	5
POSSIBILI RISVOLTI PRATICI	7
L’ESPERIMENTO DI HICKOK E SABERI	8
TENTATIVI DI REPLICA E CONTROVERSIE	9
L’IMPORTANZA DI UNA REPLICA SU LARGA SCALA	11
METODO.....	12
RISULTATI.....	15
DISCUSSIONE.....	19
CONFRONTO CON I RISULTATI DI HICKOK, FARAHBOD E SABERI.....	19
<i>ENTRAINMENT</i> – SÌ O NO?.....	20
IL PROBLEMA DELLA FASE	20
CONCLUSIONE	23
RINGRAZIAMENTI	23
BIBLIOGRAFIA	24

Introduzione

Questa tesi di laurea è uno studio di replica diretta del lavoro pubblicato da Hickok, Farahbod e Saberi nel 2015. In questo lavoro gli autori hanno dimostrato come l'ascoltare uno stimolo ritmico a frequenza regolare riesca a influenzare le nostre capacità percettive negli attimi immediatamente successivi all'ascolto. Esse, infatti, tendono ad oscillare nel tempo alla stessa frequenza (3 Hz) dello stimolo ritmico presentato poco prima, ma con fase invertita. Questo esperimento ha fatto parlare di sé anche in quanto fornirebbe delle prove forti a sostegno dell'esistenza dell'*entrainment*: una sorta di meccanismo *bottom-up* di sincronizzazione automatica tra il ritmo dello stimolo e le onde cerebrali.

Il fenomeno dell'*entrainment* è un fenomeno molto interessante per la psicologia, anche per le sue possibili applicazioni pratiche. Tuttavia, il risultato osservato dagli autori sembra forse troppo lusinghiero e la recente “crisi della replicabilità” ha messo in guardia varie scienze, tra cui la psicologia, circa i possibili danni derivati dalla scelta di non attuare in modo serio repliche dirette e controllate di studi in grado di suscitare un tale scalpore. È per questo attualmente in corso un esperimento di replica diretta su larga scala con approccio multilaboratorio che vuole cercare di testare in modo definitivo la solidità dei risultati di Hickok e colleghi. I dati che andrò a presentare in questa tesi sono stati raccolti, tra le altre cose, per contribuire ad essa.

In tal senso, la mia tesi di laurea congiunge allo studio dell'*entrainment* molti dei temi che hanno attraversato le scienze psicologiche contemporanee, tra cui un approccio di replica diretta e la scelta di raccogliere dati in modalità *multi-lab* con protocolli condivisi. Nel resto del testo illustrerò i concetti fondamentali

dell'*entrainment*, oltre che alcuni dei precetti metodologici che si sono sviluppati negli ultimi anni nell'ambito della crisi della replicabilità. Per concludere illustrerò la mia replica diretta dell'esperimento di Hickok, Farahbod e Saberi. Seguirà l'analisi e la discussione dei risultati ottenuti, anche attraverso un confronto con i dati originali. Il confronto si limiterà, ovviamente, ai soli dati da me raccolti.

Il legame tra ritmo e percezione – l'*entrainment*

Il ritmo è una caratteristica fondamentale di gran parte degli stimoli che percepiamo quotidianamente: basandoci sulle regolarità temporali che li caratterizzano, siamo in grado di riconoscere in essi un certo ritmo (Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022; Hickok, Farahbod, & Saberi, 2015; Heideman, te Woerd, & Praamstra, 2015; Rouse, Patel, & Kao, 2021). Sembra, secondo recenti studi, che la struttura ritmica di un certo stimolo (sia esso una canzone, una persona che ci parla, un orologio che ticchetta) riesca a influenzare le nostre abilità percettive facendole “oscillare a tempo”. Questo di conseguenza incrementerebbe le nostre abilità percettive in quei momenti dove, in base alle regolarità temporali individuate nello stimolo, si suppone possa succedere qualcosa e viceversa (Haegens & Golumbic, 2018; Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022). In parole povere ciò significa che, ad esempio, ascoltando il ticchettio di un orologio il nostro cervello riuscirebbe a interiorizzarne la ritmicità per poter “ottimizzare” l'udito in corrispondenza dei ticchetti, piuttosto che dei momenti di silenzio (Sun, Michalareas, & Poeppel, 2021; Bauer, Debener & Nobre, 2020)

Com'è possibile tutto ciò? Alcuni pensano che il meccanismo che permette tutto questo sia un processo *bottom-up* di sincronizzazione automatica (chiamata anche *entrainment*) tra il ritmo dello stimolo e le onde cerebrali (Hickok, Farahbod, &

Saberi, 2015; Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022; Sun, Michalareas, & Poeppel, 2021) . Le onde cerebrali, infatti, riflettono l'attivazione locale dei neuroni, e di conseguenza la loro capacità di rispondere a un certo stimolo in un dato momento (Buzsáki & Draguhn, 2004; Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022). La definizione più diffusa di *entrainment* lo descrive come un allineamento graduale tra le fasi di due sistemi oscillatori: le onde cerebrali e uno stimolo esterno ritmico o quasi-ritmico (Bauer, Debener & Nobre, 2020).

Vari esperimenti mostrerebbero come questo meccanismo entri in gioco non solamente nell'ascolto musicale, ma anche nella comprensione del linguaggio (Riecke, Formisano, Sorger, Başkent, & Gaudrain, 2018; Rouse, Patel, & Kao, 2021) e nella percezione visiva (De Graaf, et al., 2013; Spaak, De Lange, & Jensen, 2014). Si pensa che l'*entrainment* possa giocare un ruolo importante anche nelle nostre capacità di attenzione selettiva in situazioni in cui sono presenti molti stimoli diversi in contemporanea (Lakatos, et al., 2013).

Dubbi e questioni aperte

Nonostante i risultati, però, la questione resta aperta. Queste “oscillazioni percettive” potrebbero infatti essere dovute sia a un processo *bottom-up* automatico di *entrainment* tra il ritmo dello stimolo e le onde neurali, sia a processi di tipo *top-down* di aspettativa temporale (Haegens & Golumbic, 2018; Obleser & Kayser, 2019; Hickok, Farahbod, & Saberi, 2015), sia a entrambi (Hickok, Farahbod, & Saberi, 2015). Inoltre le oscillazioni percettive che sono state individuate potrebbero anche non riflettere delle vere oscillazioni neurali, ma anche essere causate da una sequenza di potenziali acustici evocati dalle regolarità ritmiche dello

stimolo (Haegens & Golumbic, 2018; Obleser & Kayser, 2019; Forseth, Hickok, Rollo, & Tandon, 2020).

Un ostacolo importante alla ricerca è rappresentato dal fatto che a livello sperimentale è estremamente difficile dimostrare la presenza di una reale attività oscillatoria di *entrainment* durante la stimolazione ritmica (Haegens & Golumbic, 2018). In questo caso infatti è praticamente impossibile separare gli effetti di un ipotetico *entrainment* da altri processi neurologici concomitanti determinati dalla presenza dello stimolo (Saberri & Hickok, 2021; Obleser & Kayser, 2019; Bauer, Debener & Nobre, 2020; Haegens & Golumbic, 2018).

Per rispondere a questa domanda in modo inequivocabile è necessario quindi focalizzarsi sul cosiddetto *forward entrainment* (Bauer, Debener & Nobre, 2020; Saberri & Hickok, 2021). Il *forward entrainment* sarebbe quella parte del processo di *entrainment* che andrebbe a influenzare la nostra percezione anche dopo l'interrompersi dello stimolo ritmico. Le onde cerebrali continuerebbero a oscillare per qualche frazione di secondo anche in assenza dello stimolo ritmico e con esse continuerebbero ad "oscillare" anche le nostre abilità percettive (Saberri & Hickok, 2021). A livello sperimentale è quindi necessario individuare un'oscillazione percettiva o neurale negli attimi immediatamente successivi all'ascolto di uno stimolo ritmico (Sun, Michalareas, & Poeppel, 2021; Saberri & Hickok, 2021; Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022). Questo è esattamente quello che è stato rilevato da Hickok e colleghi nel 2015, motivo per cui questo esperimento è particolarmente importante.

Possibili risvolti pratici

Dare una risposta a questi interrogativi, e quindi capire in modo preciso con quali meccanismi il ritmo riesca a influenzare la percezione, è importante anche per una serie di possibili risvolti pratici.

In ambito medico, ad esempio, negli ultimi anni è stato approfondito l'uso di terapie che si basano sull'ascolto di stimoli ritmici. Una di queste è la Stimolazione Uditiva Ritmica, che viene utilizzata prevalentemente nella riabilitazione post ictus, in pazienti che hanno subito traumi cerebrali e nel trattamento del morbo di Parkinson (Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022). Altri studi sono riusciti invece a incrementare lievemente le capacità di comprensione del linguaggio di alcuni soggetti tramite degli stimoli elettrici ritmici mandati direttamente al cervello (Riecke, Formisano, Sorger, Başkent, & Gaudrain, 2018). Si è per questo parlato della possibilità di sfruttare l'*entrainment* per la creazione di nuovi tipi di apparecchi acustici (Obleser & Kayser, 2019). Un altro filone di ricerca sta invece provando a manipolare le attività cerebrali tramite l'uso di stimolazione ritmica per migliorare la memoria o il sonno (Ngo, Martinetz, Born, & Mölle, 2013; Obleser & Kayser, 2019).

Anche queste ricerche però, in particolare quelle che riguardano le terapie, sono da prendere con le pinze in quanto sembra che il modo in cui i vari individui reagiscono agli stimoli sia altamente variabile (Dalla Bella, et al., 2017; te Woerd, Oostenveld, de Lange, & Praamstra, 2018). Un'altra questione aperta, quindi, riguarda il come le differenze individuali vadano a influenzare il rapporto tra ritmo e percezione (Bauer, Debener & Nobre, 2020; Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022; Sun, Michalareas, & Poeppel, 2021).

L'esperimento di Hickok e Saberi

Nel 2015 è stato svolto uno studio che potrebbe dare una svolta a questa discussione. Hickok, Farahbod e Saberi hanno individuato nell'uomo la presenza di un'oscillazione percettiva che è durata per vari cicli successivamente a una stimolazione ritmica. L'esperimento prevedeva l'ascolto di una serie di stimoli acustici la cui ampiezza in una prima parte oscillava a una frequenza di 3 Hz, e poi rimaneva costante. La prima parte aveva la funzione di stimolare "ritmicamente" l'ascoltatore. In metà degli stimoli, nella seconda parte, era presente un breve suono (a 1k Hz) nascosto. Quello che veniva richiesto ai soggetti era di stabilire se il suono era presente o meno, e i risultati evidenziano come l'accuratezza dei partecipanti nel compito tendesse ad oscillare nel tempo alla stessa frequenza (3 Hz) dello stimolo ritmico presentato poco prima, ma con fase invertita (Hickok, Farahbod, & Saberi, 2015). Questo risultato, se confermato, proverebbe quindi l'esistenza nell'uomo di fenomeni di *entrainment* di tipo oscillatorio, oltre che del prolungarsi dei suoi effetti nei momenti immediatamente successivi alla stimolazione ritmica (Hickok, Farahbod, & Saberi, 2015; Bauer, Debener & Nobre, 2020; Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022). Questi risultati sono in linea con un esperimento neurofisiologico del 2013 di Lakatos e colleghi, in cui era stata registrata un'attività oscillatoria successiva a una stimolazione ritmica nella corteccia uditiva della scimmia, e in cui però non erano state approfondite le conseguenze dal punto di vista percettivo (Lakatos, et al., 2013).

Tutto ciò è importante, inoltre, se si considera il fatto che Hickok e colleghi sono stati i primi a mettere in piedi un esperimento che richiedeva di individuare un certo suono, piuttosto che sul discriminare le differenze fra vari suoni. fra Gli studi

precedenti sul *forward entrainment*, infatti, erano prevalentemente *task* di discriminazione. Questo tipo di approccio nello studio dell'*entrainment* si è mostrato più soggetto a rischio di *confounding* (Saber & Hickok, 2021). Un *task* di individuazione che mostra un'oscillazione percettiva, al contrario, lascia meno spazio a dubbi.

Tentativi di replica e controversie

Ci sono, però, dei dubbi che aleggiano attorno allo studio di Hickok e colleghi. La prima questione riguarda la numerosità del campione: lo studio originale prevedeva un totale di 5 soggetti, un numero troppo piccolo per trarre conclusioni definitive (Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022). La seconda questione riguarda gli studi successivi che sono stati fatti, i cui risultati sono stati contraddittori (Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022).

Nel 2021 di Sun e colleghi hanno svolto due repliche (una concettuale e una diretta) dello studio di Hickok e colleghi, riscontrando la presenza (non significativa) dell'effetto solamente nel 36% dei partecipanti e senza la relazione di anti-fase trovata nello studio originale. Secondo loro ha senso alla luce dei risultati scartare l'ipotesi dell'*entrainment* oscillatorio, e spiegare fenomeni di questo tipo solamente con meccanismi top-down di aspettativa temporale (Sun, Michalareas, & Poeppel, 2021). Saber e Hickok hanno però riscontrato, soprattutto per quanto riguarda alcune scelte di analisi dei dati, una serie di differenze che avrebbero influenzato gli esiti della replica. Hanno quindi ri-analizzato i dati grezzi di Sun e colleghi in modo analogo a come era stato fatto da loro nell' esperimento originale, ottenendo al contrario dei risultati che dimostrerebbero la presenza di un *forward entrainment*

(Saberri & Hickok, 2021). La replica “diretta”, secondo Saberri e Hickok non sarebbe quindi stata realmente tale.

A proposito di questo, è essenziale tenere a mente la differenza tra esperimenti di replica diretta e concettuale. Una replica diretta a livello metodologico vuole essere una copia esatta dell’esperimento originale. Una replica concettuale, invece, si concentra sul mantenere intatta l’idea originale, ma presenta una serie di differenze a livello procedurale (Zwaan, Etz, Lucas, & Donnellan, 2017; Grassi, 2019). Sono quindi logicamente più affidabili le repliche di tipo diretto, in quanto evitano l’insorgere di controversie sulle possibili influenze causate dalle scelte procedurali diverse dallo studio originale, come nel caso della replica di Sun e colleghi (Zwaan, Etz, Lucas, & Donnellan, 2017; Grassi, 2019).

Due recenti studi hanno al contrario ottenuto risultati positivi facendo uso di stimoli identici a quelli usati nello studio di Hickok e colleghi registrando in contemporanea l’attività cerebrale dei soggetti sperimentali (Saberri & Hickok, 2021). Forseth e colleghi (2020) hanno misurato l’attività delle regioni fronto-centrali del cervello di 37 persone tramite elettrocorticografia (ECoG), somministrandogli simultaneamente lo stesso *task* dell’esperimento di Hickok e colleghi. I risultati del test sono coerenti con quelli dell’esperimento originale: è stata individuata l’oscillazione percettiva, durata circa un ciclo, ma con fase diversa (di $\frac{1}{4}$ di ciclo). Grazie all’ECoG, inoltre, si è potuto riscontrare una modulazione dell’attività neurale nella corteccia uditiva primaria coerente con lo stimolo ritmico di 3 Hz durata un ciclo (Forseth, Hickok, Rollo, & Tandon, 2020).

L’altro studio, di Simon e Wallace (2017) prevedeva un *task* molto simile a quello di Hickok e colleghi che faceva uso degli stessi stimoli sonori, mentre a livello

cerebrale è stata misurata tramite elettroencefalogramma (EEG) l'attività della sola corteccia uditiva primaria. La differenza più importante con il *task* originale era che il suono da individuare era presentato senza alcun tipo di rumore bianco di fondo. I risultati lasciano intendere la presenza di un *forward entrainment*, questa volta antifasico (come nello studio originale) (Simon & Wallace, 2017).

I risultati, seppur in parte convincenti, sono comunque troppo deboli per poter trarre una qualunque conclusione solida sull'argomento. Le ambiguità presenti sono imputabili in gran parte alla natura concettuale delle repliche svolte finora, le quali permettono sempre in un modo o nell'altro di attribuire alle differenze procedurali i motivi del fallimento - o al contrario del successo - dell'esperimento (Zwaan, Etz, Lucas, & Donnellan, 2017). Il pericolo in questi casi è di entrare in una sorta di *loop* di ricerca degenerativa in cui si iniziano a cercare ipotesi alternative sempre nuove per spiegare il fallimento delle repliche (Lakatos & Musgrave, 1970), piuttosto che accettare il fallimento della teoria e cercarne una nuova. Questo va assolutamente evitato, e si può fare ciò solamente organizzando una replica in grado di fornire risultati sufficientemente solidi da poter porre fine alle controversie esistenti.

L'importanza di una replica su larga scala

Viene da sé la necessità di una replica diretta su larga scala per dare una validità definitiva allo studio di Hickok e colleghi, potenzialmente importantissimo per il dibattito sul legame tra ritmo e percezione, sull'effettiva esistenza dell'*entrainment* e su quanto esso possa essere diffuso tra la popolazione umana (Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022).

Questo è esattamente l'obiettivo di Henry e colleghi, che stanno attualmente raccogliendo una grande mole di dati adottando un approccio multilaboratorio

grazie all'aiuto di più di 30 laboratori sparsi in giro per il mondo. Ognuno dei laboratori coinvolti deve reclutare almeno 5 soggetti volontari e somministrargli il *task* di Hickok e colleghi tramite uno *script* fornito dagli autori, a cui verranno infine spediti i dati grezzi. Questa strategia è sicuramente la migliore per svolgere repliche con grandi numerosità campionarie ma allo stesso tempo attendibili (Grassi, 2019; Zwaan, Etz, Lucas, & Donnellan, 2017). Nonostante il problema dell'influenza del contesto sui risultati, onnipresente in psicologia (Zwaan, Etz, Lucas, & Donnellan, 2017), sarà infatti altamente improbabile che i fattori ambientali di tutti i laboratori coinvolti vadano a influenzare i soggetti allo stesso modo. Lo studio è stato preregistrato: questo, sommato alla natura multilaboratorio del lavoro, consentirà inoltre di evitare comportamenti maliziosi da parte degli autori quali la riscrittura delle ipotesi alla fine della raccolta dati (HARKing) (Grassi, 2019).

I dati che andrò a presentare in questa tesi sono stati raccolti per contribuire a questa replica. Nonostante le analisi che ho comunque svolto, viene da sé che un qualche tipo di conclusione definitiva possa emergere solamente dall'analisi dei dati raccolti da tutti i laboratori coinvolti che verrà svolta da Henry e colleghi.

Metodo

Hanno partecipato all'esperimento 5 volontari (4 uomini, 1 donna) di età compresa tra i 23 e i 28 anni con udito normale. A ciascun partecipante è stato garantito l'assoluto anonimato. Ai partecipanti sono stati presentati gli stessi stimoli usati da Hickok, Farahbod e Saberi (Hickok, Farahbod, & Saberi, 2015).

Gli stimoli, della durata totale di 4 secondi, erano costituiti per i primi 3 secondi (per un equivalente di 9 cicli) da rumore bianco con ampiezza modulata a una

frequenza di 3 Hz (profondità di modulazione dell'80%). Questa prima parte funge da stimolo ritmico. Nell'ultimo secondo, dove invece l'ampiezza non era modulata, in metà degli stimoli era presente un breve suono da individuare (a 1k Hz, della durata di 50 ms) che poteva essere presentato in 1 tra 9 posizioni temporali possibili. In relazione al ritmo di modulazione (3 Hz), queste posizioni temporali erano distanziate ognuna 0.25 cicli (equivalenti a 83.3 ms) dalla successiva, fino ad arrivare a 2.00 cicli. Il suono poteva quindi essere presente in un punto tra i secondi 3 e 3.666 dello stimolo, corrispondenti a 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 e 2 cicli dell'oscillazione a frequenza 3 Hz, nel caso in cui fosse continuata (**figura 1**). Inoltre, il livello del suono era selezionato fra 5 valori diversi di rapporto segnale-rumore (SNR) relativo al rumore bianco non modulato (-18 dB, -14.5 dB, -8.5 dB, -6 dB), per poter misurare la funzione psicometrica.

In ogni *trial* dell'esperimento veniva chiesto ai partecipanti se avevano sentito o meno il suono nella sezione non modulata dello stimolo. I partecipanti facevano ciò usando la tastiera del computer, premendo un pulsante corrispondente alla risposta "Sì" oppure un altro pulsante corrispondente alla risposta "No". La probabilità che il suono fosse presente era del 50%. La posizione temporale e il livello del suono erano selezionati in modo casuale. Ogni partecipante ha svolto 5 sessioni di ascolto degli stimoli. Ognuna di esse includeva 450 *trial*, per un totale di 2250 *trial* per partecipante.

Gli stimoli sono stati sintetizzati per mezzo del programma MATLAB con una frequenza di campionamento di 44.1 kHz e una risoluzione di 16 bit. I suoni venivano presentati tramite uno *script* sul programma PsychoPy installato su un computer Windows e attraverso una scheda audio Focusrite Scarlett. Il segnale in

uscita dalla scheda audio veniva mandato a una cuffia Sennheiser HDA 300, e i partecipanti durante l'ascolto si trovavano all'interno di una cabina isolata acusticamente. Il livello di presentazione del rumore bianco non modulato era di 70 dB SPL.

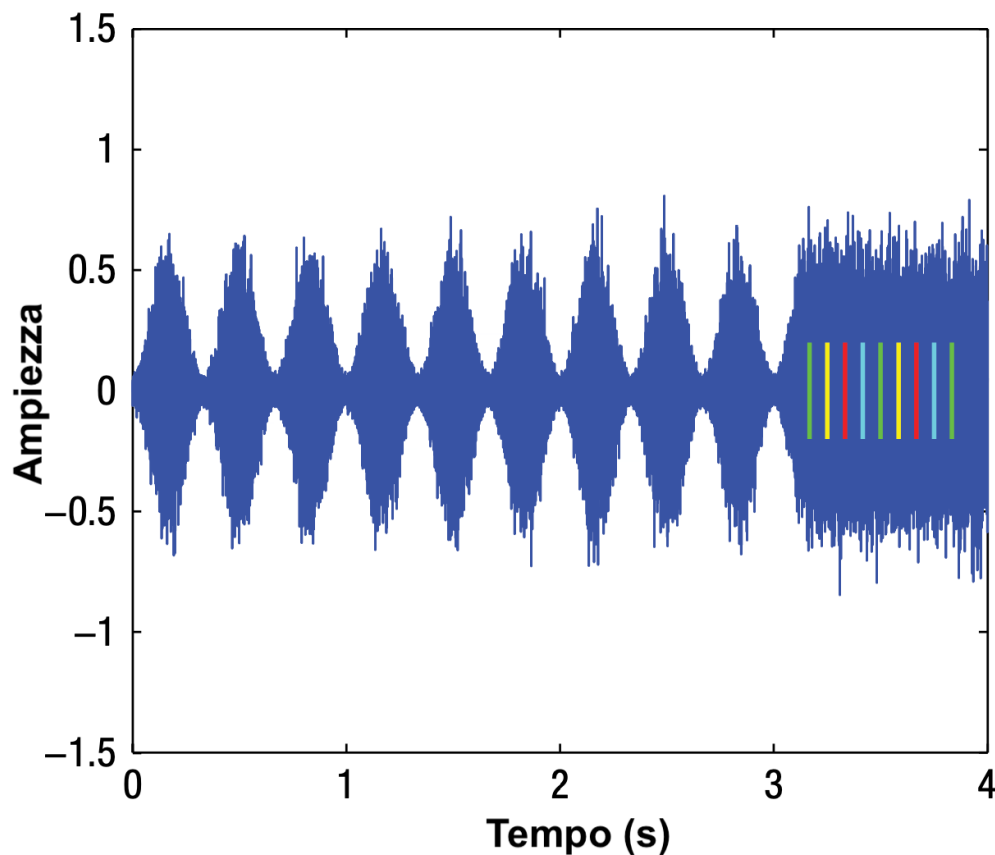


Figura 1. Il segnale acustico presentato ai soggetti per intero. Nei primi 3 secondi l'ampiezza del rumore bianco (evidenziato in blu) era modulata a una frequenza di 3 Hz, mentre nell'ultimo secondo rimaneva costante. Nell'ultimo secondo in metà degli stimoli era presente un breve suono da individuare (a 1k Hz, della durata di 50 ms) che poteva essere presentato in 1 tra 9 posizioni temporali possibili (corrispondenti alle barrette colorate visibili nel grafico) (Hickok, Farahbod & Saberi, 2015).

Risultati

Per l'analisi dei dati ho seguito le stesse procedure di Hickok e colleghi. Ho calcolato la proporzione di risposte corrette media per le varie intensità a cui il suono da individuare è stato presentato (-18 dB, -14.5 dB, -8.5 dB, -6 dB SNR), come mostrato nella **figura 2**. Essa è stata calcolata dividendo il numero di risposte corrette totali per il numero di risposte totali (corrette e sbagliate). La proporzione di risposte corrette, in modo analogo ai risultati dell'esperimento originale, cambia nel modo più brusco tra i punti 1 e 3 visibili nel grafico (-18 e -8.5 dB SNR). Da ciò consegue che le *trial* corrispondenti al punto 2 (in cui il suono da individuare era presentato a -14.5 dB SNR) siano quelle con più variabilità di *performance* e dove si può andare a osservare in modo più chiaro l'oscillazione percettiva. Per questo motivo, in linea col procedimento di Hickok e colleghi, tutte le analisi che seguono si concentrano solamente su questo insieme di *trial*.

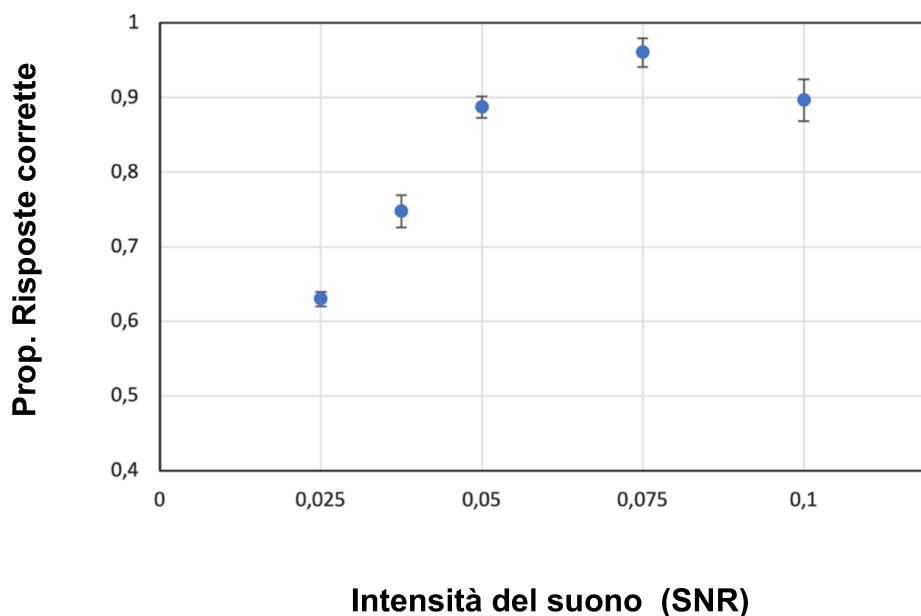
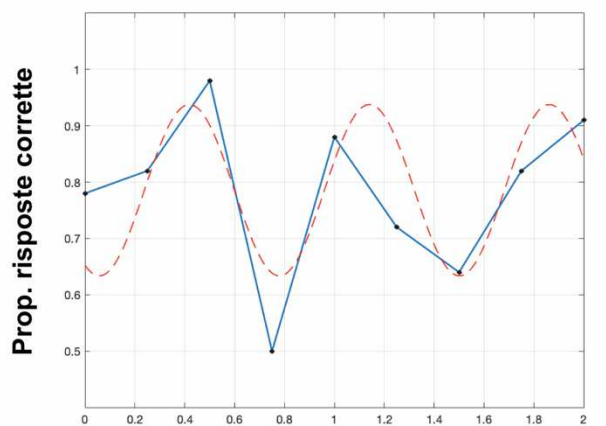
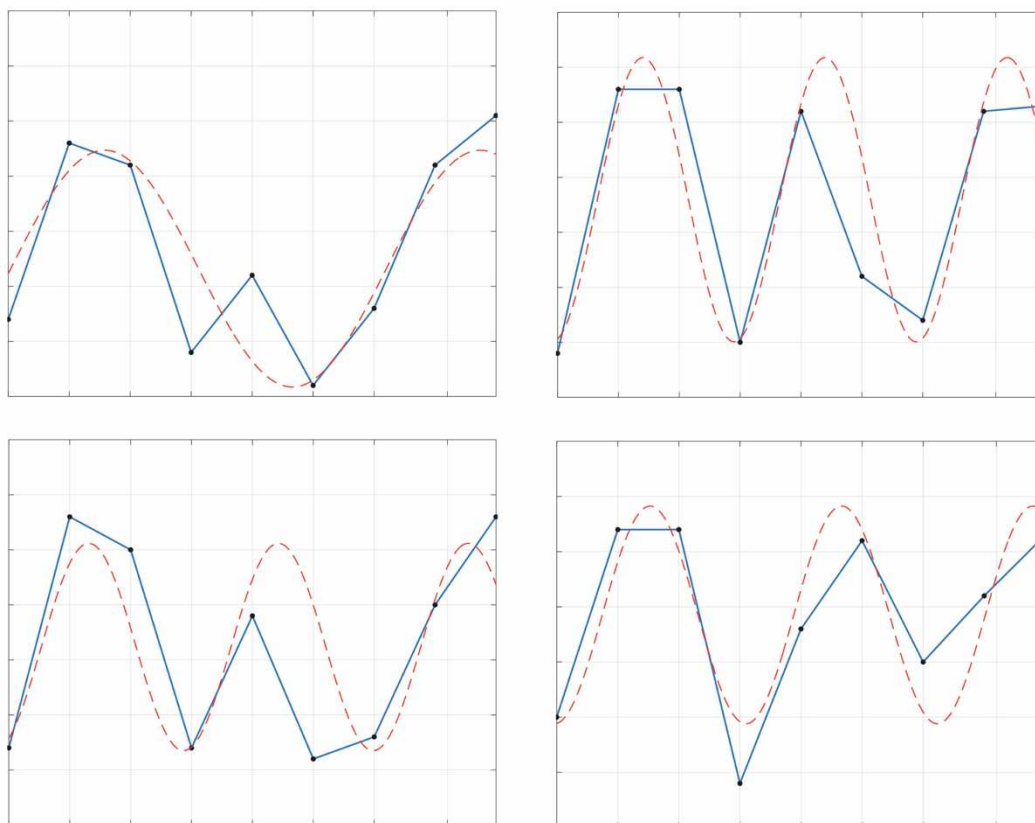


Figura 2. *Proporzione media di risposte corrette in funzione dell'intensità del suono da individuare. Le barre di errore indicano ± 1 SEM.*



Posizione del suono da individuare (cicli)

Figura 3. *Proporzione di risposte corrette in funzione della posizione temporale in cui è stato presentato lo stimolo da individuare per ognuno dei 5 soggetti. Le sinusoidi tratteggiate in rosso sono quelle che meglio approssimano l'andamento di ciascun grafico.*

La **figura 3** mostra la proporzione di risposte corrette date da ogni soggetto in funzione della posizione temporale a cui il suono da individuare è stato presentato. Sono state contate come risposte corrette sia le risposte affermative in caso di suono presente, sia le risposte negative in caso di suono assente. La proporzione di risposte corrette è stata quindi calcolata, per ciascuna posizione temporale, dividendo il numero di risposte corrette totali per il numero di risposte totali (corrette e sbagliate). Dai grafici emerge chiaramente come, a parità di volume, la posizione temporale in cui il suono da individuare è stato presentato abbia influito pesantemente sulla *performance* di ognuno dei soggetti. Questa oscilla, in media (**figura 4**), da una percentuale di risposte corrette del 50% a una del 93%. La posizione temporale mediamente peggiore risulta essere quella corrispondente a 0.75 cicli, mentre la migliore risulta essere quella corrispondente a 2 cicli.

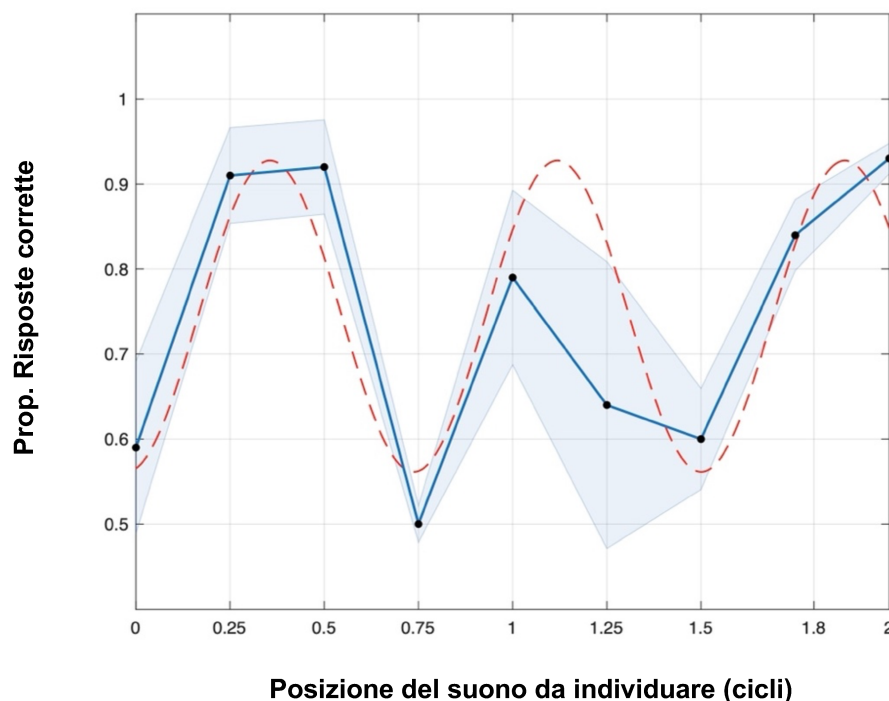


Figura 4. *Proporzione media di risposte corrette in funzione della posizione temporale in cui è stato presentato lo stimolo da individuare. L'area azzurra rappresenta un intervallo di confidenza del 95%.*

La frequenza dell'oscillazione di *performance* media non risulta perfettamente coerente con quella dello stimolo ritmico: non 3 Hz ma circa 4 Hz. Questo fa sì che l'andamento dell'oscillazione percettiva, confrontato con quello che sarebbe stato l'andamento del rumore bianco nel caso in cui avesse continuato ad oscillare, inizi come antifasico per poi finire in fase (**figura 5**). Questo è parzialmente coerente con i risultati dell'esperimento originale.

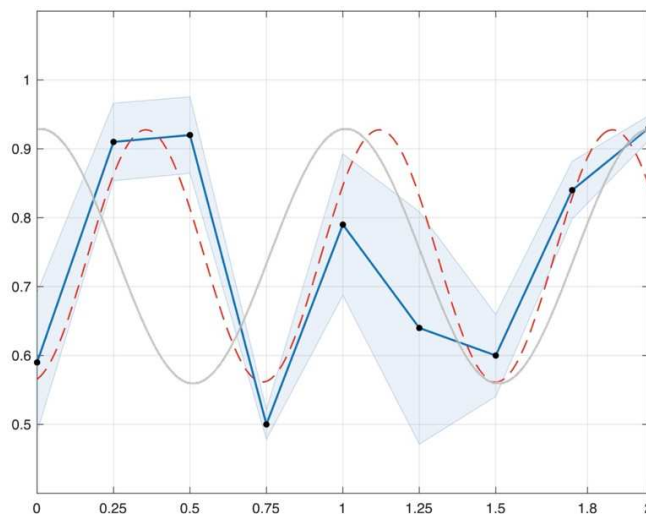


Figura 5. L'andamento dell'oscillazione percettiva media di tutti e 5 i soggetti (circa 4 Hz - linea rossa tratteggiata), confrontato con quello che sarebbe stato l'andamento della prima porzione del rumore bianco nel caso in cui avesse continuato ad oscillare (3 Hz - linea grigia).

È stata svolta un'analisi della varianza sui dati della figura 3, che mostra un effetto altamente significativo della posizione temporale del suono da individuare sulla performance: $F(8,32) = 18.48$, $p < 0.001$. Questo è in linea con i risultati di Hickok e colleghi ($F(8,32) = 10.61$, $p < 0.001$). La significatività della differenza tra le proporzioni delle risposte corrette è stata poi misurata svolgendo un t-test per ciascuna combinazione possibile di posizioni temporali (**figura 6**). La presenza di

un elevato numero di risultati significativi conferma l'andamento oscillatorio della performance dei soggetti nel tempo.

	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9
TP1	—								
TP2	*	—							
TP3	**	—	—						
TP4	—	***	***	—					
TP5	*	—	*	**	—				
TP6	—	*	*	—	—	—			
TP7	—	**	***	—	*	—	—		
TP8	*	—	*	***	—	—	**	—	
TP9	**	—	—	***	—	*	***	*	—

*p <.05. **p <.01. ***p <.001.

Figura 6. Tabella riassuntiva dei risultati dei t-test svolti per ciascuna combinazione possibile di posizioni temporali.

Discussione

Confronto con i risultati di Hickok, Farahbod e Saberi

Le posizioni temporali in cui era presentato il suono da individuare hanno inciso pesantemente sulla *performance* di ogni soggetto nel *task*. La *performance* ha seguito nel tempo un andamento oscillatorio. Ciò significa che l'ascolto di uno stimolo ritmico ha indotto un'oscillazione nelle capacità percettive dei soggetti nei momenti esattamente successivi all'ascolto dello stimolo. Questi risultati sono coerenti con quelli dell'esperimento originale di Hickok e colleghi.

La frequenza dell'oscillazione percettiva è però risultata di 4 Hz, diversa dai 3 Hz ottenuti da Hickok e colleghi. La sua fase iniziale risulta opposta rispetto allo stimolo ritmico, coerentemente con quanto ipotizzato. A causa delle differenze di frequenza questo andamento antifasico si va però gradualmente a perdere.

L'oscillazione percettiva non mostra segni di attenuamento al termine del secondo ciclo. Un esperimento di *follow-up* di Hickok e colleghi (svolto su un campione molto esiguo di 3 persone), aveva infatti mostrato come l'oscillazione tendesse a proseguire per un totale di 3-4 cicli, per poi declinare (Hickok, Farahbod, & Saberi, 2015). Questo aspetto, che la replica di Henry e colleghi non va a coprire, andrebbe comunque anch'esso indagato su un campione vasto per poter trarre conclusioni solide.

Entrainment – sì o no?

I risultati della mia replica mostrano chiaramente un'oscillazione, ma il campione è troppo piccolo per trarre conclusioni solide. Per fare questo bisognerà aspettare i risultati della replica su larga scala, che ci permetterà di capire la reale validità all'esperimento di Hickok e colleghi.

Sarà poi necessario svolgere altri studi neurofisiologici, in particolare andando ad registrare le attività dei circuiti talamocorticali (Forseth, Hickok, Rollo, & Tandon, 2020; Obleser & Kayser, 2019). Questo potrebbe potenzialmente permetterci di capire in modo definitivo se queste oscillazioni percettive siano effettivamente causate da un meccanismo di *entrainment* oscillatorio o da una serie di potenziali evocati (Forseth, Hickok, Rollo, & Tandon, 2020).

Il problema della fase

Vari altri studi hanno ottenuto risultati in linea con quelli di Hickok e colleghi, ottenendo un'oscillazione percettiva antifasica rispetto allo stimolo ritmico (Spaak, De Lange, & Jensen, 2014; Simon & Wallace, 2017). Questo aspetto è particolarmente controverso, se si considera il fatto che altri esperimenti simili

hanno ottenuto un'oscillazione percettiva in fase con lo stimolo ritmico (Jones, Moynihan, MacKenzie, & Puente, 2002; Ellis & Jones, 2010; Barnes & Jones, 2000).

L'oscillazione percettiva in fase era stata intuitivamente spiegata con meccanismi top-down di aspettativa temporale: il cervello massimizzerebbe la propria attenzione nelle posizioni temporali corrispondenti ai picchi previsti dello stimolo ritmico (Henry, Obleser, Crusey, & Peelle, 2022). L'oscillazione antifasica secondo questa prospettiva non avrebbe senso di esistere, oppure dovrebbe essere spiegata con meccanismi di altro tipo. Recentemente, però, si è trovata una possibile spiegazione alternativa basata anch'essa su processi attentivi. Il cervello nel caso di uno stimolo ritmico irrilevante (come nel caso del rumore bianco dell'esperimento di Hickok e colleghi) focalizzerebbe la sua attenzione nei momenti in cui è previsto il silenzio secondo una strategia del tipo "*listening in the gaps*" (Simon & Wallace, 2017). Secondo questa visione in questo caso sarebbe quindi avvenuto una sorta di *entrainment* "al contrario". Questo è coerente col fatto che tutti gli altri studi di questo tipo usano come stimoli ritmici degli stimoli che richiamano il suono o i suoni da individuare/discriminare, e non un rumore bianco (come nel nostro caso) (Saberri & Hickok, 2021). Lo studio di Hickok è stato il primo a testare una casistica del genere, e la spiegazione "*listening in the dips*" da questo punto di vista sembra sensata.

Per alcuni, però, risolvere la contraddittorietà di questi risultati in questo modo è troppo riduttivo (Haegens & Golumbic, 2018). Probabilmente ciò che determina tutto ciò è un intreccio simultaneo e non ancora chiaro di processi *bottom-up* e *top-down* (Hickok, Farahbod, & Saberri, 2015).

Un processo di tipo *bottom-up* che potrebbe essere coinvolto nelle oscillazioni antifasiche, ad esempio, è quello che vedrebbe coinvolti dei “circuiti” di onde cerebrali theta e gamma. La frequenza dello stimolo ritmico tramite *entrainment* si sincronizzerebbe alle onde theta, che a loro volta modulerebbero le onde gamma coinvolte nelle parti di cervello deputate all’elaborazione degli stimoli sonori (Hickok, Farahbod, & Saberi, 2015; Giraud & Poeppel, 2012).

Questo è coerente con uno studio di O’Connell e colleghi, che ha osservato nelle scimmie una fase differente nell’*entrainment* a seconda delle aree della corteccia uditiva coinvolte. Di fronte a uno stimolo simile a quello usato nell’esperimento di Hickok e colleghi le aree deputate a elaborare le frequenze tra gli 11.000 e i 16.000 Hz hanno subito un *entrainment* in fase, mentre quelle deputate a elaborare frequenze più basse (come lo stimolo a 1k Hz usato nel nostro caso) in antifase (O’Connell, et al., 2015). Tutto ciò potrebbe avere un ruolo importante nella comprensione del parlato. Contando che una sillaba è solitamente composta da una consonante (frequenze alte) e da una vocale (frequenze basse), una frase finisce di fatto per alternare con una certa ritmicità stimoli composti prevalentemente da frequenze alte o basse. Proprio per questo un meccanismo del genere potrebbe per esempio aiutare, successivamente all’ascolto di una vocale (frequenze basse), a ottimizzare la percezione delle sole frequenze alte (consonanti) peggiorando in contemporanea quella delle frequenze basse (O’Connell, et al., 2015). Nel prossimo futuro sarà quindi essenziale cercare di capire anche l’eventuale legame tra la natura dello stimolo ritmico e la fase dell’oscillazione percettiva.

Dobbiamo, infine, non dimenticarci che la natura dei *task* richiesti ai soggetti e degli stimoli presentati di tutti questi studi era spesso diversa. Il nostro esperimento

faceva uso come stimolo ritmico di un rumore bianco con intensità modulata, ma altri di suoni che rimandavano allo stimolo da individuare, o anche di momenti di silenzio. Ciò che cambia è anche la frequenza di oscillazione dello stimolo ritmico. Infine anche i suoni da individuare differivano: non solo un breve suono singolo ma anche sequenze di suoni o di rumore bianco (Saberri & Hickok, 2021). E' possibile pensare che tutti questi fattori possano aver influito sulle differenze di risultato, e sicuramente anche questo sarà un aspetto da chiarire in futuro.

Conclusione

Emerge chiaramente come il filone di ricerca dedicato all'*entrainment* e al legame tra ritmo e percezione sia allo stesso tempo intrigante e dibattuto. La replica su larga scala dello studio di Hickok e colleghi potrebbe potenzialmente aiutare a rispondere a una serie di domande molto importanti ancora aperte. Nonostante il campione da me analizzato sia molto basso, i risultati fanno ben sperare in quanto è chiara l'esistenza di un *pattern* ricorrente. La replica su larga scala di Henry e colleghi, a cui questi dati andranno a contribuire, potrà chiarire in modo definitivo la validità del tutto.

Ringraziamenti

Ringrazio il prof. Grassi per avermi supportato e indirizzato in questo progetto di tesi, coloro che si sono proposti come volontari per questo esperimento e senza cui tutto questo non sarebbe stato possibile, i tecnici di laboratorio per l'aiuto prezioso con la calibrazione e con lo *script* e Lorenzo Pertegato Zennaro per l'aiuto datomi con R nella fase di analisi dei dati. Ringrazio infine tutte quelle persone che, in un

modo o nell'altro, hanno contribuito alla mia crescita personale e a rendere la mia vita - oltre che questo percorso universitario – un qualcosa di speciale.

Bibliografia

Barnes, R., & Jones, M. (2000). Expectancy, Attention, and Time. *Cognitive Psychology*, 254-311.

Bauer, A.-K. R., Debener, S., & Nobre, A. C. (2020). Synchronisation of Neural Oscillations and Cross-modal Influences. *Trends in Cognitive Sciences*, 481-495.

Bauer, A.-K. R., Jaeger, M., Thorne, J. D., Bendixen, A., & Debener, S. (2015). The auditory dynamic attending theory revisited: A closer look at the pitch comparison task. *Brain Research*, 198-210.

Buzsáki, G., & Draguhn, A. (2004). Neuronal Oscillations in Cortical Networks. *Science*, 1926-1929.

Dalla Bella, S., Benoit, C.-E., Farrugia, N., Keller, P. E., Obrig, H., Mainka, S., & Kotz, S. A. (2017). Gait improvement via rhythmic stimulation in Parkinson's disease is linked to rhythmic skills. *Scientific Reports*, 7, 42005.

De Graaf, T. A., Gross, J., Paterson, G., Rusch, T., Sack, A. T., & Thut, G. (2013). Alpha-Band Rhythms in Visual Task Performance: Phase-Locking by Rhythmic Sensory Stimulation. *PLoS One*, 8, e60035–e60042.

Ellis, R. J., & Jones, M. (2010). Rhythmic context modulates foreperiod effects. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 2274–2288.

- Forseth, K., Hickok, G., Rollo, P., & Tandon, N. (2020). Language prediction mechanisms in human auditory cortex. *Nature Communications*, 1–14.
- Giraud, A. L., & Poeppel, D. (2012). Cortical oscillations and speech processing: Emerging computational principles and operations. *Nature Neuroscience*, 511–517.
- Grassi, M. (2019). What’s new in psychology? Open Science! *Giornale Italiano di Psicologia*, 689-712.
- Haegens, S., & Golumbic, E. (2018). Rhythmic facilitation of sensory processing: A critical review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 150–165.
- Heideman, S. G., te Woerd, E. S., & Praamstra, P. (2015). Rhythmic entrainment of slow brain activity preceding leg movements. *Clinical Neurophysiology*, (126) 348–355.
- Henry, M. J., Obleser, J., Crusey, M., & Peelle, J. E. (2022). How strong is the rhythm of perception? A registered replication of Hickok, Farahbod, and Saberi (2015). *PsyArXiv*.
- Hickok, Farahbod, & Saberi. (2015, Maggio 5). Entrainment to Acoustic Rhythms Induces Subsequent Perceptual Oscillation. *Psychological Science*, 1006-1013.
- Jones, M., Moynihan, H., MacKenzie, N., & Puente, J. (2002). Temporal Aspects of Stimulus-Driven Attending in Dynamic Arrays. *Psychological Science*, 313–319.

- Lakatos, I., & Musgrave, A. (1970). *Criticism and the growth of knowledge*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lakatos, P., Musacchia, G., O'Connell, M. N., Falchier, A. Y., Javitt, D. C., & Schroeder, C. E. (2013). The Spectrotemporal Filter Mechanism of Auditory Selective Attention. *Neuron*, 750–761.
- Lin, W., Oetinger, D. A., Bakker-Marshall, I., Wilsch, A., ElShafei, H. A., Rassi, E., & Haegens, S. (2021). No behavioural evidence for rhythmic facilitation of perceptual discrimination. *European Journal of Neuroscience*, 1-13.
- Ngo, H.-V. V., Martinetz, T., Born, J., & Mölle, M. (2013). Auditory Closed-Loop Stimulation of the Sleep Slow Oscillation Enhances Memory. *Neuron*, 545-553.
- Obleser, J., & Kayser, C. (2019). Neural Entrainment and Attentional Selection in the Listening Brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 913-926.
- O'Connell, M., Barczak, A., Ross, D., McGinnis, T., Schroeder, C. E., & Lakatos, P. (2015). Multi-Scale Entrainment of Coupled Neuronal Oscillations in Primary Auditory Cortex. *Frontiers in human neuroscience*, 1-16.
- Riecke, L., Formisano, E., Sorger, B., Başkent, D., & Gaudrain, E. (2018). Neural Entrainment to Speech Modulates Speech Intelligibility. *Current Biology - CB*, 28 (2), pp.1 - 9.
- Rouse, A. A., Patel, A. D., & Kao, M. H. (2021). Vocal learning and flexible rhythm pattern perception are linked: Evidence from songbirds. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(29).

- Saberi, K., & Hickok, G. (2021). Forward Entrainment: Evidence, Controversies, Constraints, and Mechanisms. *bioRxiv*.
- Simon, D. M., & Wallace, M. T. (2017). Rhythmic Modulation of Entrained Auditory Oscillations by Visual Inputs. *Brain Topography*, 565–578.
- Spaak, E., De Lange, F. P., & Jensen, O. (2014). Local Entrainment of Alpha Oscillations by Visual Stimuli Causes Cyclic Modulation of Perception . *The Journal of Neuroscience*, 34(10):3536–3544.
- Sun, Y., Michalareas, G., & Poeppel, D. (2021). The impact of phase entrainment on auditory detection is highly variable: revisiting a key finding. *European Journal of Neuroscience*, 55(11–12), 3373– 3390.
- te Woerd, E. S., Oostenveld, R., de Lange, F. P., & Praamstra, P. (2018). Entrainment for attentional selection in Parkinson's disease. *Cortex*, 166-178.
- Zwaan, R. A., Etz, A., Lucas, R. E., & Donnellan, M. (2017). Making Replication Mainstream. *Behavioral and Brain Sciences*, 1–50.