



n° 442 – 18 December 2025

[Musicae Scientiae](#) 1–22 2025

Serial-order and rule-learning abilities in children with musical training

[Bettoni R¹](#), [Rinaldi L^{2,3}](#), [Macchi Cassia V¹](#)

1 Department of Psychology, University of Milano-Bicocca, Italy; 2 Department of Brain and Behavioral Sciences, University of Pavia, Italy; 3 Cognitive Psychology Unit, IRCCS Mondino Foundation, Italy

Playing a musical instrument is an engaging, challenging activity that has been linked to benefits in several cognitive domains, including language. Insofar, these benefits have been traced back to working memory abilities related to order information, as both language and music are highly complex signals that require maintaining temporally embedded structures unfolding over time. Yet, the critical question remains open as to whether the positive effects of music experience also extend to another constituent element of language learning, namely the complex process of encoding and generalizing abstract structures from item positions in sequences (i.e., rule learning). Here, we investigated this question by comparing the performance of two groups of 8- to 11-year-old children with ($N=33$) and without ($N=33$) music training in three visual memory tasks aimed to test Item short-term memory, Serial-Order memory, and Rule-Learning abilities. Results showed that children with at least 1 year of instrumental music training tend to perform better than their non-musician peers not only in the Item and Serial-Order memory tasks but also in the Rule-Learning task, where they abstracted ABAB or ABBA rule-like structures from sequences of visual shapes and generalized them to novel shapes. This trend persisted even after controlling for parental education and other socioeconomic factors, providing new evidence that the effects of music training spread to cognitive domains not necessarily linked to music or audition, as they boost the ability to abstract high-order structures from any potential learning environment. This evidence may prove crucial in clarifying the mechanisms underlying the beneficial effects of music-based interventions in language learning disabilities.

Suonare uno strumento musicale è un'attività coinvolgente e stimolante che è stata associata a benefici in diversi ambiti cognitivi, compreso quello linguistico. Finora, tali benefici sono stati ricondotti alle capacità della memoria di lavoro relative all'ordine delle informazioni, poiché sia il linguaggio che la

musica sono segnali altamente complessi che richiedono il mantenimento di strutture temporali incorporate che si sviluppano nel tempo. Tuttavia, rimane aperta la questione fondamentale se gli effetti positivi dell'esperienza musicale si estendano anche a un altro elemento costitutivo dell'apprendimento del linguaggio, ovvero il complesso processo di codifica e generalizzazione di strutture astratte a partire dalla posizione degli elementi in sequenze (cioè l'apprendimento delle regole). In questo studio gli Autori hanno esaminato tale questione confrontando le prestazioni di due gruppi di bambini di età compresa tra 8 e 11 anni con (N=33) e senza (N=33) formazione musicale in tre compiti di memoria visiva volti a testare la memoria a breve termine degli elementi, la memoria dell'ordine seriale e le capacità di apprendimento delle regole. I risultati hanno dimostrato che i bambini con almeno un anno di formazione musicale strumentale tendono a ottenere risultati migliori rispetto ai loro coetanei non musicisti non solo nei compiti di memoria di oggetti e sequenze, ma anche nel compito di apprendimento delle regole, in cui hanno astratto strutture simili alle regole ABAB o ABBA da sequenze di forme visive e le hanno generalizzate a forme nuove. Questa tendenza è rimasta anche dopo aver controllato il livello di istruzione dei genitori e altri fattori socioeconomici, fornendo prove del fatto che gli effetti della formazione musicale si estendono a domini cognitivi non necessariamente legati alla musica o all'udito, poiché potenziano la capacità di astrarre strutture di ordine superiore da qualsiasi potenziale ambiente di apprendimento. Tali prove potrebbero rivelarsi cruciali per chiarire i meccanismi alla base degli effetti benefici degli interventi basati sulla musica nei disturbi dell'apprendimento del linguaggio.

Res Dev Disabil 2025 Dec 11:168:105180

Bridging internal states with music: An exploratory analysis of music-induced embodied emotion regulation in autistic youth and young adults

Park M¹, Yoo GE²

1 Wooidawoom Center for Child Development and Disability, Eunhaengjeong-ro 49, Yangcheon-gu, Seoul 08024, South Korea; 2 Department of Music Therapy, Graduate School, Ewha Womans University, Ewhayeodae-gil 52, Seodaemun-gu, Seoul 03760, South Korea. minzupark.mt@gmail.com; bbird27@ewha.ac.kr

Emotion dysregulation in autistic individuals often manifest as atypical reactivity or maladaptive expressions, frequently accompanied by dissociation or detachment from self-experiences, avoidance, suppression, or rigidity in response to external and internal experiences. These challenges highlight the need for population-specific approaches to emotion regulation (ER). This study explored the potential of music to integrate interoceptive and exteroceptive processes for embodied ER. We proposed the Music-Induced Embodied Emotion Regulation (M-EER) model, a conceptual framework that guides sequential regulation through synchronization with modulated musical stimuli, and outlined step-by-step procedures for its implementation. Pilot interventions were conducted with three autistic individuals, one youth and two young adults, aged 19-25. Each participated in two 1-hour trial sessions, including pre-intervention interviews. During structured M-EER sessions, participants engaged with sequentially modulated music and developed self-directed plans for applying ER in everyday life. Following the sessions, participants provided self-reports of their regulatory experiences, which were transcribed and analyzed using thematic analysis to capture first-person perspectives. Findings suggest that the M-EER model facilitated regulated emotional changes by mapping sensory processing onto motor expression (e.g., instrument playing) and promoting embodied internal state shifts (e.g., arousal modulation). Empirical insights from lived experiences were summarized with the core themes of "agency in creating expressive space" and "music-self connection" emerged. The thematic framework of ER derived from this study supports the role of music as a bridge between bottom-up sensory mechanisms and reflective, top-down processes (e.g., reflection on emotional changes). Although exploratory in scope, these findings also highlight the potential of the M-EER model as an integrative paradigm that combines structured clinical guidance with individual agency to address ER challenges on the autism spectrum, offering promising directions for future research and clinical application.

La disregolazione emotiva negli individui autistici si manifesta spesso come reattività atipica o espressioni disadattive, frequentemente accompagnate da dissociazione o distacco dalle esperienze personali, evitamento, soppressione o rigidità in risposta alle esperienze esterne e interne. Queste

problematiche evidenziano la necessità di approcci specifici per la regolazione emotiva (ER) di questa popolazione. Lo studio ha esplorato il potenziale della musica per integrare i processi interocettivi ed esteroceettivi per una ER incarnata. Viene proposto il modello Music-Induced Embodied Emotion Regulation (M-EER), un quadro concettuale che guida la regolazione sequenziale attraverso la sincronizzazione con stimoli musicali modulati, e vengono delineate procedure dettagliate per la sua implementazione. Sono stati condotti interventi pilota con tre individui autistici, un adolescente e due giovani adulti, di età compresa tra i 19 e i 25 anni. Ciascuno di essi ha partecipato a due sessioni di prova di un'ora, comprese le interviste pre-intervento. Durante le sessioni strutturate di M-EER, i partecipanti si sono impegnati con musica modulata in modo sequenziale e hanno sviluppato piani autogestiti per applicare l'ER nella vita quotidiana. Al termine delle sessioni, i partecipanti hanno fornito resoconti delle loro esperienze di regolazione, che sono stati trascritti e analizzati utilizzando l'analisi tematica per cogliere le prospettive in prima persona. I risultati suggeriscono che il modello M-EER ha facilitato i cambiamenti emotivi regolati mappando l'elaborazione sensoriale sull'espressione motoria (ad esempio, suonare uno strumento) e promuovendo cambiamenti incarnati dello stato interno (ad esempio, modulazione dell'eccitazione). Le intuizioni empiriche derivanti dalle esperienze vissute sono state sintetizzate con i temi centrali di "capacità di agire nella creazione di uno spazio espressivo" e "connessione musica-sé". Il quadro tematico dell'ER derivato da questo studio sostiene il ruolo della musica come ponte tra i meccanismi sensoriali bottom-up e i processi riflessivi top-down (ad esempio, la riflessione sui cambiamenti emotivi). Sebbene esplorativi, questi risultati evidenziano anche il potenziale del modello M-EER come paradigma integrativo che combina una guida clinica strutturata con la capacità di agire individuale per affrontare le sfide dell'ER nello spettro autistico, offrendo direzioni promettenti per la ricerca futura e l'applicazione clinica.

Ann NY Acad Sci 2025 Dec 9

An active inference model of meter perception and the urge to move to music

Matthews TE¹, Vuust P^{1,2}, Cannon J³

1 Center for Music in the Brain, Department of Clinical Medicine, Aarhus University, Aarhus, Denmark; 2 Royal Academy of Music, Aarhus, Denmark; 3 Department of Psychology, Neuroscience & Behaviour, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada

Why do some rhythms make us want to move and not others? A predictive processing account suggests that prediction errors drive this phenomenon, but this hypothesis remains underspecified. Here, we operationalized this account as a Bayesian model that infers whether a rhythmic sequence is caused by a metered or unmetered template, coupled with an active inference rule in which movement occurs if the sensory feedback from movement would reduce the prediction errors generated by this inference process. Surprisal, as an index of prediction error, was calculated for each rhythm with and without a metronome (a proxy for the feedback from moving along), with delta surprisal as the difference. Surprisal increased linearly as a function of rhythmic complexity, while delta surprisal showed a similar pattern with urge to move ratings shown in previous studies, and this relation was confirmed in an online study. These results suggest that the urge to move to music is driven by the potential to reduce meter-based prediction errors via the expected feedback from moving along to the beat. This work provides a crucial update to the predictive processing account and highlights a key role of active inference and prediction-based learning in our musical experiences.

Perché alcuni ritmi fanno venire voglia di muoversi e altri no? Una teoria basata sulla codifica predittiva suggerisce che questo fenomeno sia determinato da errori di previsione, ma tale ipotesi rimane poco specificata. In questo studio gli Autori rendono operativa tale teoria sotto forma di modello bayesiano che compie inferenze su quanto una sequenza ritmica sia causata da un template metrico misurato o non metrico, abbinato a una regola di inferenza attiva in cui il movimento si verifica se il feedback sensoriale, derivante dal movimento, riduce gli errori di previsione generati da tale processo di inferenza. Il surprisal, che gli Autori definiscono come indice dell'errore di previsione, è stato calcolato per ogni ritmo con e senza metronomo (un proxy per il feedback derivante dal movimento), insieme al delta del surprisal come differenza. Il surprisal è aumentato linearmente in funzione della complessità ritmica, mentre il delta del surprisal ha mostrato un andamento simile a quello delle valutazioni dell'impulso a muoversi mostrate in studi precedenti, e questa relazione è stata confermata in uno studio online. Tali

risultati suggeriscono che l'impulso a muoversi a ritmo di musica sia guidato dal potenziale di ridurre gli errori di previsione basati sul metro attraverso il feedback atteso dal movimento a tempo di musica. Questo lavoro fornisce un aggiornamento cruciale alla teoria della codifica predittiva e sottolinea il ruolo chiave dell'inferenza attiva e dell'apprendimento basato sulla previsione nelle esperienze musicali.

Sci Rep 2025 Dec 6

Acoustic features of music differentially modulate anxiety through EEG gamma oscillations and prefrontal connectivity

Luo Q¹, Wang Y^{#1}, Yang K^{#2}, Qian A³, Nie P⁴, Xi M⁴, Zhang W³, Chen G⁵

1 Department of Applied Biology and Chemical Technology, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 2 Department of Building Environment and Energy Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 3 Laboratory for Bone Metabolism, School of Life Sciences, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China; 4 Hospital of Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China; 5 Department of Computing, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China.

Contributed equally. civet.luo@gmail.com; ximin86269@nwpu.edu.cn; wenjuan_zhang2017@nwpu.edu.cn

University students may experience high levels of anxiety and depression, which can adversely affect their daily lives and academic performance and represent significant mental health conditions. Music therapy has been proposed as a promising noninvasive approach, but the role of specific acoustic features and their neural underpinnings remain unclear. In this study, we investigated the effects of tonality (major vs. minor) and timbre (piano vs. violin) on state anxiety. Seventy-four students were assigned to one of four intervention groups and passively listened to excerpts from Bach's works. Anxiety was assessed with the State-Trait Anxiety Inventory (STAI-S), and neural responses were recorded with EEG. Analyses included power spectral density of beta and gamma bands, EEG-based brain source localization analyses with standardized low resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA), and Granger causality of directional connectivity. Results showed that major-key violin music elicited the strongest anxiety reduction among anxious participants. This effect was accompanied by gamma-band alterations, with Granger causality indicating that enhanced central-to-DLPFC connectivity predicted reductions in STAI-S scores, while dACC activation appeared as a concomitant effect. Beta and gamma oscillations further exhibited complementary properties, with gamma being more sensitive to music intervention and beta reflecting inter-individual stability. These findings will provide preliminary mechanistic insights into how elemental musical features can modulate anxiety.

Gli studenti universitari possono sperimentare livelli elevati di ansia e depressione, che possono influire negativamente sulla loro vita quotidiana e sul rendimento scolastico e rappresentare problemi di salute mentale significativi. La musicoterapia è stata proposta come approccio non invasivo promettente, ma il ruolo delle specifiche caratteristiche acustiche e delle loro basi neurali rimane poco chiaro. In questo studio, gli Autori hanno studiato gli effetti della tonalità (maggiore vs minore) e del timbro (pianoforte vs violino) sull'ansia. Settantaquattro studenti sono stati assegnati a uno dei quattro gruppi di intervento e hanno ascoltato passivamente brani tratti dalle opere di Bach. L'ansia è stata valutata con lo State-Trait Anxiety Inventory (STAI-S) e le risposte neurali sono state registrate con l'EEG. Le analisi hanno incluso la densità di potenza spettrale delle bande beta e gamma, analisi di localizzazione delle sorgenti cerebrali basate sull'EEG con tomografia elettromagnetica cerebrale a bassa risoluzione standardizzata (sLORETA) e causalità di Granger della connettività direzionale. I risultati hanno dimostrato che la musica per violino in tonalità maggiore ha provocato la più forte riduzione dell'ansia tra i partecipanti ansiosi. Questo effetto è stato accompagnato da alterazioni della banda gamma, con la causalità di Granger che indicava che una maggiore connettività tra il centro e la DLPFC (corteccia prefrontale dorsolaterale) era predittiva di una riduzione dei punteggi STAI-S, mentre l'attivazione della dACC (corteccia cingolata anteriore dorsale) appariva come un effetto concomitante. Le oscillazioni beta e gamma hanno inoltre mostrato proprietà complementari, con la gamma più sensibile all'intervento musicale e la beta che rifletteva la stabilità inter-individuale. Tali risultati forniscono informazioni meccanicistiche preliminari su come le caratteristiche musicali elementari possano modulare l'ansia.

The Pierfranco and Luisa Mariani Foundation ETS

The Mariani Foundation for paediatric neurology, based in Milan (Italy), provides training and supports care and research in the field. Furthermore, it has become a reference organisation for the global scientific community on projects about the neurosciences and music, fostering the dialogue between scientists, educators and performers, especially aimed at enhancing children's harmonious development and wellbeing.

These activities and the series of international conferences "The Neurosciences and Music" are carried out by the Foundation in partnership with the most prestigious scientific and academic institutions in the "Neuromusic" area, while the publishing activity is carried out mainly in collaboration with the New York Academy of Sciences (NYAS), under the aegis of which the Foundation entered this sector since the year 2000.

Another aim of the Mariani Foundation is raising the awareness of scientific progress in this rapidly evolving area. Through its Neuromusic Facebook page and the newsletters "Neuromusic News" and "Neuromus.it News" (the latter by the growing Italian Network neuromus.it), the Foundation helps disseminate the results of research and promotes relevant initiatives.

Thanks to its acknowledged experience, the Foundation is also invited to participate in multiple events in Italy and abroad, and to join interdisciplinary networks focused on the social and educational impact of music during childhood and its benefits for children with special needs.

"Neuromusic News"

Direttore responsabile Luisa Bonora

Pubblicazione periodica. Registrazione n. 318 Tribunale di Milano del 10-06-2011

Edited by Fondazione Mariani

Contributors: Luisa Lopez, Maria Majno and Barbara Bernardini

Editorial coordinator: Renata Brizzi

For further information: neuromusic@fondazione-mariani.org