



**KRYSZYNA RYMARCZYK**

SWPS University, Warsaw, Poland

ORCID iD: 0000-0002-4085-9480

**AGATA CYBULSKA**

SWPS University, Warsaw, Poland

ORCID iD: 0000-0002-7373-0501

## **TRENING MUZYCZNY A PLASTYCZNOŚĆ MÓZGU W OKRESIE ROZWOJU I DOROSŁOŚCI**

### **MUSIC TRAINING AND BRAIN PLASTICITY DURING DEVELOPMENT AND ADULTHOOD**

*PRACA FINANSOWANA Z PROJEKTU NCN, NR 2016/21/N/HS6/02845*



## ABSTRACT

Modern research conducted using neuroimaging methods has provided a lot of valuable information about the plasticity of the human brain. Musical training has proven to be a useful framework for examining training-related plasticity in the human brain. The learning to play an instrument is a highly complex task that involves the interaction of different modalities e.i. visual, sensorimotor as well as higher-order cognitive functions like inhibition or working memory. The review highlights that music training can modify many aspects of brain function and structure. This paper also indicates significance of musical training for children's cognitive development, according to transfer of musical skills to other non-musical abilities. Furthermore, we provided information according potential use of musical training in children with developmental disorders as well in adults with brain damaged.

## STRESZCZENIE

W ostatnich latach badania prowadzone z wykorzystaniem metod neuroobrazowych, dostarczyły wielu cennych informacji na temat plastyczności ludzkiego mózgu. Jednym z modeli do badania neuroplastyczności, który cieszy się coraz większym zainteresowaniem badaczy jest trening muzyczny, który angażuje jednocześnie kilka systemów sensorycznych, układ motoryczny a także złożone procesy poznawcze. Artykuł prezentuje aktualną wiedzę na temat zmian funkcjonalnych i strukturalnym mózgu, które zachodzą pod wpływem trening muzycznego, z uwzględnieniem wieku jego rozpoczęcia, rodzaju a także indywidualnych predyspozycji osoby uczącej się. Celem opracowania jest także wykazanie znaczenia treningu muzycznego dla rozwoju poznawczego dzieci, w tym roli transferu umiejętności muzycznych na inne pozamuzyczne zdolności. W przeglądzie uwypuklono także terapeutyczny potencjał treningu muzycznego, między innymi w aspekcie klinicznym.

**KEYWORDS:** *musical training, development, neuroplasticity, brain, cognitive functions*

**SŁOWA KLUCZOWE:** *trening muzyczny, rozwój, neuroplastyczność, mózg, funkcje poznawcze*

## WSTĘP

Ludzki mózg ma niezwykłą zdolność do zmian w odpowiedzi na wymagania środowiska. Zmiany o charakterze trwałym, zachodzące na poziomach komórkowym, synaptycznym i sieciowym, określane są terminem plastyczności mózgu (Kossut, 2019). W odniesieniu do badań prowadzonych w obszarze neuronauki poznawczej (*cognitive neuroscience*) termin plastyczności mózgu, inaczej neuroplastyczności, stosowany jest głównie do opisu zmian w strukturze i funkcji mózgu, które wpływają na zachowanie danej jednostki i zazwyczaj są związane z powtarzalnym doświadczeniem lub intensywnym treningiem (Lövdén i in., 2013). Jednym z modeli do badania plastyczności korowej u ludzi jest trening muzyczny (Herholz, Zatorre, 2012). Gra na instrumencie muzycznym wymaga współdziałania układu słuchowego, somatosensorycznego i ruchowego, ale – co istotne – angażuje także funkcje wykonawcze, w tym kontrolę hamowania oraz pamięć. Ta złożoność treningu muzycznego daje możliwość zbadania, w obrębie tego samego modelu, w jaki sposób systemy sensoryczno-motoryczne łączą się z procesami poznawczymi i jak różne rodzaje treningu wpływają na te interakcje. Prowadzone badania koncentrują się na wpływie zarówno krótkotrwałych, jak i długotrwałych treningów muzycznych na mózg. Do zobrazowania zmian, które zachodzą na skutek krótkotrwałych treningów, np. kilkudniowych, wykorzystuje się głównie metody badania aktywności mózgu, takie jak np. elektroencefalografię (EEG)<sup>[1]</sup> lub funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI)<sup>[2]</sup>. W odniesieniu do treningów długotrwałych badania mają na celu przede wszystkim określenie różnic w objętości wybranych struktur mózgu pomiędzy profesjonalnymi muzykami a osobami bez wykształcenia muzycznego. Wskaźniki objętości (VBM)<sup>[3]</sup>, zarówno całego mózgu, jak i wybranych struktur, oparte są na pomiarach grubości istoty szarej. Dodatkowo w niektórych badaniach analiza dotyczy także połączeń strukturalnych (DTI)<sup>[4]</sup>.

W pierwszej części artykułu przedstawiono wpływ treningu muzycznego na układ słuchowy, odnosząc się w tej części głównie do zmian funkcjonalnych m.in. w korze słuchowej, zachodzących w wyniku percepcji muzyki. Następnie omówiono zmiany strukturalne, które w tym wypadku są konsekwencją długotrwałego grania na instrumencie muzycznym. Kolejno scharakteryzowano rolę

treningu muzycznego w kontekście poznawczego rozwoju dziecka, uwzględniając znaczenie transferu umiejętności muzycznych na inne pozamuzyczne obszary. Na koniec przedstawiono możliwy potencjał treningu muzycznego, m.in. w kontekście klinicznym.

## PERCEPCJA MUZYKI A ZMIANY FUNKCJONALNE MÓZGU

Percepcja muzyki angażuje przede wszystkim układ słuchowy i dlatego jest on jednym z systemów, który ulega największym zmianom pod wpływem treningu muzycznego. Zmiany funkcjonalne będące wynikiem tego rodzaju treningu zachodzą na różnych piętrach drogi słuchowej, tj. pnia mózgu (Wong i in., 2007), pierwotnej kory słuchowej (*primary auditory cortex*, A1), drugorzędowej kory słuchowej (*secondary auditory cortex*, A2) (Schneider i in., 2002) oraz obszarów zaangażowanych w poznanie słuchowe wyższego rzędu (np. Lappe i in., 2008). Badania profesjonalnych muzyków wskazują, że wraz z wiekiem rozpoczęcia nauki gry na fortepianie i liczbą lat nauki zwiększa się aktywność wyżej wymienionych obszarów mózgu (Kraus, Chandrasekaran, 2010). Co ciekawe, poznawcze przetwarzanie muzyki nie jest samo w sobie zależne od treningu muzycznego. Jak wskazują bowiem badania dorosłych, nawet osoby bez specjalnego doświadczenia muzycznego cechuje wrażliwość na pewne cechy muzyczne, takie jak np. tonacja C-dur vs. a-moll (Toivainen, Krumhansl, 2003). Podobne wnioski płyną z badania 6-miesięcznych niemowląt, w przypadku których okazało się, że preferują one słuchanie utworu Mozarta w wersji oryginalnej (He, Trainor, 2009). Niemowlęta, podobnie jak dorośli, są wrażliwe na naruszenie struktury harmoniczej i reagują krótszym czasem patrzenia w kierunku źródła dźwięku, gdy w prezentowanym im utworze muzycznym pojawiają się np. fałszywe akordy (Folland i in., 2012). W odniesieniu do nabywania zdolności przetwarzania muzyki badacze są zgodni i twierdzą, że zachodzi ono poprzez statystyczne uczenie się, analogicznie do sposobu nabywania kompetencji w zakresie mowy w ojczystym języku (Saffran i in., 1996). Powyższe założenie wskazuje na wrodzone, tj. uwarunkowane biologicznie podłoże przetwarzania

obu typów informacji słuchowych, które następnie w ciągu pierwszych kilku miesięcy i lat życia w określonym środowisku ulega zawężeniu do dźwięków danej kultury, zarówno w przypadku muzyki (np. właściwości skali), jak i dźwięków mowy (np. fonemy i prozodia) (Kuhl, 2010).

Interesujących danych odnośnie do zmian funkcjonalnych w układzie słuchowym na skutek treningu muzycznego dostarczają badania profesjonalnych muzyków. W badaniach EEG (Shahin i in., 2003), w którym brali udział skrzypkowie i pianiści oraz osoby niebędące muzykami, zastosowano paradygmat biernej percepcji. Uczestnikom badania prezentowano określone dźwięki skrzypiec, fortepianu oraz dźwięki o częstotliwości podstawowej. Wykazano, że w przypadku muzyków, w porównaniu z niemuzykami, dźwięki instrumentów wywoływały większe pobudzenie zarówno w prawej, jak i w lewej korze słuchowej, co potwierdza założenie, że plastyczność mózgu w dużym stopniu zależy od doświadczenia. Dodatkowo w innym badaniach fMRI z udziałem profesjonalnych skrzypków i trębaczy okazało się, że zmiany funkcjonalne w korze słuchowej są zależne od barwy instrumentu muzyka (Pantev i in., 2001). Innymi słowy, wielkość pobudzenia mózgu u skrzypka i trębacza była dodatkowo skorelowana odpowiednio z barwą skrzypiec i trąbki.

Wraz z indywidualnym doświadczeniem i rodzajem treningu muzycznego percepcja muzyki angażuje także inne, poza słuchowymi, korowe obszary mózgu. Jednym z nich jest dolny zakręt czołowy, odpowiedzialny za przetwarzanie składni muzycznej (Margulis i in., 2009), ale także nabywanie reguł gramatycznych zarówno rodzimego (Friederici, 2009), jak i obcego języka (Umejima, Flynn, Sakai, 2024). W badaniach EEG (Koelsch i in., 2000), jak również fMRI (Tillmann i in., 2006) potwierdzono, że wystąpienie nieoczekiwanego akordu w utworze muzycznym prowadziło u osób, które nie miały wykształcenia muzycznego, do pobudzenia dolnego zakrętu czołowego, szczególnie po prawej stronie mózgu. Warto zauważyć, że obszar dolnego zakrętu czołowego zaliczany jest również do sieci tzw. neuronów lustrzanych (*mirror neuron system*, MNS) (Rizzolatti i in., 2001), która aktywuje się podczas obserwowania czynności wykonywanej przez inną osobę (Heyes, 2001). Dzięki MNS jesteśmy w stanie automatycznie rejestrować sposób, w jaki zachowuje się inna osoba, a następnie to zachowanie (Buccino i in., 2004), jak również emocje (Rymarczyk i in., 2018, 2019) naśladować. Można zatem założyć, że w przypadku muzyków zmysłowe

doświadczenie muzyczne będzie ściśle powiązane z działaniem, tj. np. słyszany dźwięk będzie wyzwał wyobrażenie ruchu palców imitujących grę (Bangert i Altenmüller, 2003) i odwrotnie, tj. ruchy palców imitujące grę będą wyzwały wyimaginowany dźwięk (Bangert i in., 2006).

Podsumowując, wyniki dostępnych badań dowiodły, że trening muzyczny, zarówno ten kilkugodzinny, trwający w laboratorium, jak i ten długotrwały, związany z nauką gry na instrumencie muzycznym, kształtuje przetwarzanie słuchowe, prowadząc do zmian funkcjonalnych, tj. wzrostu aktywności mózgu. Warto dodać, że zmiany te nie zachodzą, jak wcześniej zakładano, tylko w obszarach kory nowej, ale także na poziomie pnia mózgu (Strait i in., 2012). Biorąc pod uwagę, że obraz mózgowej organizacji funkcji muzycznych zależy od doświadczenia muzycznego, ale także może być zróżnicowany ze względu na wrodzone predyspozycje, przyszłe badania powinny dążyć do określenia ich znaczenia.

## **EKSPRESJA MUZYKI I JEJ WPŁYW NA POZIOMIE FUNKcjONALNYM I STRUKTURALNYM MÓZGU**

Gra na instrumencie muzycznym, szczególnie tym wymagającym koordynacji obu rąk, np. na skrzypcach czy fortepianie, angażuje rozproszoną sieć motoryczną, która obejmuje różne struktury mózgu, zależnie od etapu nabywania umiejętności (Hikosaka i in., 2002). W pierwszym etapie wzrost aktywności obserwowany jest przede wszystkim w pierwotnej korze ruchowej oraz korze przedruchowej (Buccino, 2004). Obszary te są odpowiedzialne za tworzenie reprezentacji ruchowej dla określonej sekwencji palców oraz planowania ich ruchu (Pascual-Leone, Grafman, Hallett, 1994). Kolejno zwiększa się aktywność struktur położonych podkorowo, tj. jąder podstawy, odpowiedzialnych m.in. za proces automatyzacji ruchu (Doyon i in., 2003) oraz wzrasta aktywność mózdzku, którego udział jest związany z korygowaniem błędnych ruchów oraz z optymalizacją nabytych sekwencji motorycznych (Penhune, Steele, 2012). Oczywiście nie jest zaskakujące, że w przypadku muzyków układ ruchowy i słuchowy będą pozostawać we wzajemnej interakcji (Zatorre i in., 2007). Wykazano, że w tej grupie badanych samo słuchanie

rytmu wystukiwanego palcami aktywuje korę przedruchową i pierwotną korę ruchową (Chen i in., 2008), a gra na cichej klawiaturze fortepianu aktywuje drugorzędową korę słuchową, w której zachodzi bardziej złożone przetwarzanie dźwięków, czy tworzenie reakcji emocjonalnych w odpowiedzi na bodźce słuchowe (Baumann i in., 2007).

Intensywnemu i długotrwałemu treningowi muzycznemu będą towarzyszyć zmiany nie tylko na poziomie funkcji, lecz także struktury mózgu (Olszewska i in., 2019). Okazuje się, że mózgi pianistów i skrzypków, w porównaniu z mózgami niemuzyków, różnią się pod względem rozmiaru kory ruchowej, szczególnie w obszarach reprezentacji dla dłoni (Bangert, Schlaug, 2006). Ponadto zwiększenie objętości istoty szarej, rozumiane jako wzrost połączeń synaptycznych, zidentyfikowano także w korze słuchowej (Bermudez, Zatorre, 2005). Co znaczące, zmiany anatomiczne współwystępują z czasem trwania treningu muzycznego lub z wiekiem rozpoczęcia nauki gry na instrumencie (Schlaug i in., 1995), co pozwala założyć, że są one konsekwencją doświadczenia muzycznego danej osoby. Na przykład w badaniu MRI (Schneider i in., 2002), w którym wzięli udział profesjonalni muzycy oraz muzycy amatorzy, wykazano, że w przypadku osób z wykształceniem muzycznym objętość istoty szarej w przednio-przyśrodkowej części zakrętu Heschla (pierwszorzędowa kora słuchowa; obszar kory skroniowej), była o 130% większa niż u amatorów. Zgodnie z oczekiwaniami autorów badania w grupie profesjonalistów przetwarzanie tonów sinusoidalnych wiązało się z większą aktywnością tego obszaru, w porównaniu z grupą amatorów.

Interesujących wyników dostarczają kolejne badania MRI, w których wskazano, że wraz z doświadczeniem gry na fortepianie wzrasta objętość bruzdy śródcieniowej (Foster, Zatorre, 2010), utożsamianej z integracją informacji wzrokowo-przestrzennych i dotykowych (Grefkes, Fink, 2005), a także z wykonywaniem bardziej abstrakcyjnych operacji, takich jak działania matematyczne (Kong i in., 2005). Należy jednak zauważyć, że wzrost objętości tego obszaru ma miejsce wyłącznie w przypadku treningów długotrwałych, a nie krótkotrwałych. Obrazują to wyniki badania podłużnego (Hyde i in., 2009), w którym wzięły udział 6-letnie dzieci, gdzie jedna grupa ( $n = 15$ ) uczestniczyła w cotygodniowych półgodzinnych lekcjach gry na fortepianie, zaś druga ( $n = 16$ ) brała udział w cotygodniowych 40-minutowych zajęciach muzycznych,

polegających na śpiewaniu i zabawie z bębnami. W przypadku dzieci grających, 15-miesięczny trening wiązał się ze wzrostem objętości obszarów pierwotnej kory ruchowej i pierwotnej kory słuchowej. Ponadto w tej grupie zaobserwowano wzrost zdolności motorycznych, mierzonych zręcznością palców lewej i prawej ręki oraz wzrost umiejętności rozróżniania tonacji i rytmów. W grupie kontrolnej obserwowane zmiany w objętości mózgu były związane wyłącznie z okresem rozwojowym (Hyde i in., 2009). W przypadku dorosłych muzyków zmiany objętości mózgu dotyczą przede wszystkim obszarów wyższego rzędu, odpowiedzialnych za integrowanie multimodalnych informacji sensorycznych (np. wzrokowych, słuchowych i somatosensorycznych (Gaser, Schlaug, 2003). Przyjmuje się, że wiek rozpoczęcia edukacji muzycznej jest jedną z najważniejszych zmiennych neuroplastyczności indukowanej muzyką (Steele i in., 2013). Największy wpływ na strukturę i funkcje mózgu zanotowano u tych osób, które rozpoczęły trening muzyczny przed siódmym rokiem życia (Schlaug i in., 2009), chociaż wpływ ten, w wyraźnie mniejszym zakresie, był także obserwowany u tych, którzy rozpoczęli edukację muzyczną później, ale nadal w okresie dzieciństwa (Habibi, Bessona, 2009).

W tej części artykułu należy odnieść się jeszcze do jednej struktury mózgu, tj. spoidła wielkiego mózgu (*corpus callosum*, CC), pasma istoty białej łączącego dwie półkule. Dostępne badania potwierdzają większą objętość tej struktury u profesjonalnych muzyków, w porównaniu z osobami bez edukacji muzycznej (Schlaffke i in., 2020; Schmithorst, Wilke, 2002). Różnice dotyczą przede wszystkim przedniej części spoidła wielkiego mózgu, łączącego korowe obszary ruchowe obu półkul, co tłumaczy się przede wszystkim jednoczesnym wykonywaniem ruchów obiema dłońmi. Wykazano także, że większej intensywności treningu muzycznego w dzieciństwie towarzyszyła większa objętość CC (Gruber i in., 2010). Prawdopodobnie to właśnie zwiększenie komunikacji międzypółkulowej zapewnia udział lewostronnie położonych struktur mózgu w przetwarzaniu muzyki u profesjonalistów (Gizzi, Albi, 2017). Jak sugerują badania, u osób bez doświadczenia muzycznego przewarżanie muzyki zachodzi głównie za pomocą prawej półkuli mózgu (Stewart i in., 2003).

Prawdopodobnie wzrost objętości spoidła wielkiego mózgu może także odgrywać istotną rolę w przypadku transferu muzycznego, kiedy nauka gry na instrumencie muzycznym przekłada się na inne pozamuzyczne zdolności.



## TRENING MUZYCZNY A UMIEJĘTNOŚCI POZAMUZYCZE

Panuje powszechny pogląd, że nauka gry na instrumencie muzycznym w dzieciństwie stymuluje rozwój poznawczy i prowadzi do doskonalenia umiejętności w różnorodnych obszarach pozamuzycznych, co powszechnie określa się mianem transferu muzycznego (Bangerter, Heath, 2004). Najczęściej obserwowana forma transferu ma miejsce, gdy istnieje duże podobieństwo między domeną treningową a domeną transferu (tzw. bliski transfer), np. umiejętności motoryczne nabywane podczas nauki gry na instrumencie muzycznym prowadzą do zwiększonej szybkości i dokładności pisania (Bramwell-Dicks, Felicity, 2016). Chociaż efekty bliskiego przeniesienia są stosunkowo powszechne, niezwykle trudno jest wykazać *przeniesienie dalekie*, w przypadku którego podobieństwo między domeną treningu i transferu jest znacznie mniej oczywiste, np. w nauce czytania czy operacjach matematycznych.

Z uwagi na fakt, że nauka gry na instrumencie muzycznym wymaga zaangażowania wielu funkcji wykonawczych, w tym kontroli hamowania i pamięci operacyjnej, prowadzone badania dotyczące transferu odnoszą się szczególnie do tego obszaru (Frischen i in., 2019). Jedną z ostatnich metaanaliz (Jamey i in., 2023), uwzględniającą powyższe funkcje, w której analizie poddano wyniki 22 podłużnych badań (1735 dzieci), dostarczyła dowodów, że główny efekt transferu odnosi się do kontroli hamowania. Na przykład wykazano, że wraz z czasem treningu muzycznego dzieci charakteryzuje mniejsza podatność na interferencję, co obrazują wyniki testu Stroopa. W przypadku tego zadania osoba badana proszona jest o jak najszybsze nazywanie kolorów słów, które zostały zapisane kolorową czcionką, przy czym jest ona niezgodna ze znaczeniem czytanego słowa, np. słowo *niebieski* zapisane jest czerwonym kolorem (Jamey i in., 2023). W innym paradygmacie badawczym, tj. GO/NO-GO, zadaniem badanego jest częste naciskanie spacji w odpowiedzi na prezentowane wzrokowo bodźce (90% prób GO, co prowadzi do automatyzacji reakcji ruchowej) oraz powstrzymanie się od reakcji na sporadycznie występujące bodźce (10% prób NO-GO) (Jaschke, Honing, Scherder, 2018). Dostępne wyniki badań sugerują, że w przypadku treningu muzycznego efekt transferu w zakresie kontroli hamowania jest znacząco większy niż w przypadku transferu z treningu układania konstrukcji z klocków Lego (Bugos, DeMarie, 2017) czy aktywności

sportowej (Bolduc i in., 2021). Uwzględniając fakt, że kontrola hamowania jest dobrym wskaźnikiem wysokich wyników w nauce (Allan i in., 2014; Wilkinson i in., 2020), zachowań zorientowanych na cel (Allom i in., 2016) oraz sprzyja ograniczeniu zachowań kompulsywnych w dzieciństwie (Fogel i in., 2019), zdaniem niektórych badaczy (Kraus, Chandrasekaran, 2010), edukacja muzyczna, w tym obowiązkowa nauka gry na instrumencie, powinna być ujęta w programie szkół podstawowych.

Ponieważ nauka czytania nut angażuje pamięć operacyjną (Bergman i in., 2014), badania w tym obszarze koncentrują się przede wszystkim na pamięci werbalnej. Wykazano, że dzieci i adolescentów z co najmniej 6-letnią edukacją muzyczną cechuje lepsza pamięć werbalna, w porównaniu z rówieśnikami bez wykształcenia muzycznego (Chan i in., 1998). Co więcej, nawet 3-miesięczny trening muzyczny u 10-letnich dzieci skutkowało poprawą w zakresie pojemności pamięci operacyjnej, a progres zdolności obserwowano w kolejnych siedmiu miesiącach nauki gry na instrumencie, chociaż już w mniejszym stopniu, co może wskazywać na osiągnięcie pułapu pojemności dla tej pamięci (Ho, Cheung, Chan, 2003). Interesujących danych dostarczają także wyniki badania podłużnego, w którym dzieci uczyły się gry na instrumencie muzycznym, z wykorzystaniem metody Suzuki<sup>[5]</sup> (Fujioka i in., 2006). Przedstawiono, że u badanych dzieci z każdym kolejnym rokiem nauki (od 4 do 6 r.ż.) istotnie wzrastała pojemność wzrokowej pamięci operacyjnej, mierzonej za pomocą testu Symbolu Cyfr, z testu do badania inteligencji. Niewykluczone jest jednak, że w przypadku prezentowanych wyników (Fujioka i in., 2006), specyficzny sposób nauki gry na instrumencie sam w sobie, poprzez zaangażowanie procesów uwagowych, przyczynił się do rozwoju poznawczego dzieci. W innych badaniach potwierdzono przewagę treningu muzycznego dla transferu w zakresie pamięci operacyjnej, w porównaniu z takimi aktywnościami jak dodatkowe ćwiczenia poznawcze (Holochwost i in., 2017), udział w warsztatach artystycznych (Jaschke i in., 2018) czy wokalnych (Guhn, Emerson i Gouzouasis, 2019).

Kolejny obszar badawczy dotyczący edukacji muzycznej i funkcjonowania poznawczego dzieci odnosi się do rozwoju mowy. Przyjmuje się, że różnicowanie fonemów, łączenie dźwięków mowy i ich segmentacja są podobne do różnicowania rytmicznego, melodycznego i harmonicznego (Lamb, Gregory, 1993).

Wyniki badania korelacyjnego, w którym wzięły udział cztero – – pięcioletnie dzieci, potwierdziły założenia autorów o dodatnim związku między badanymi zdolnościami językowymi i muzycznymi (Anvari i in., 2002). Podobny związek wykazano w badaniu siedmio – – ośmioletnich dzieci, gdzie dzieci o słabo rozwiniętych zdolnościach czytania przejawiały trudności w rozróżnianiu tonów i odtwarzaniu rytmu (Atterbury, 1985). Jak twierdzą autorzy cytowanego powyżej badania, trening muzyczny ma ogromny potencjał jako terapia w przypadkach dzieci z zaburzeniami rozwoju mowy i języka (SLI) lub z dysleksją (Habib i in., 2016). Warto także dodać, że umiejętność analizy słuchowej, niezbędnej podczas przetwarzania muzyki, powiązana jest także z nauką języka obcego (Brandt i in., 2012).

Chociaż większość wyników badań z udziałem dzieci zdaje się potwierdzać efekt przeniesienia umiejętności muzycznych na funkcje wykonawcze (Degé i Frischen, 2022; Rodriguez-Gomez i Talero-Gutiérrez, 2022), płynność czytania i pisanie (Anvari i in., 2002; Tierney i Kraus, 2013), pamięć werbalną (Ho i in., 2003), przetwarzanie wzrokowo-przestrzenne (Costa-Giomi, 1999), zdolności matematyczne (Cheek i Smith, 1999) oraz IQ (Schellenberg, 2004), to jednak odnaleźć można i takie badania, które nie potwierdzają zakładanego transferu. W opisanym powyżej badaniu podłużnym (Hyde i in., 2009) u dzieci, które przez 15 miesięcy uczyły się gry na fortepianie, nie wykazano wzrostu zdolności wzrokowo-przestrzennych i werbalnych w porównaniu z dziećmi, które nie przeszły szkolenia instrumentalnego. Możliwe jest, że w przypadku tego badania zarówno czas codziennego treningu muzycznego, który wynosił pół godziny, jak i czas całego treningu (15 miesięcy) okazał się zbyt krótki dla wystąpienia efektu przeniesienia.

Omawiając efekt transferu muzycznego, warto odnieść się jeszcze do tzw. efektu Mozarta. W 1993 r. w prestiżowym czasopiśmie *Nature* badacze (Rauscher, Shaw, Ky, 1993) opublikowali zaskakujące wyniki wskazujące, że u dwóch studentów po 10-minutowym wysłuchaniu sonaty Mozarta na dwa fortepiany (K448), nastąpił istotny wzrost umiejętności rozumowania przestrzennego, w porównaniu z grupą kontrolną, która słuchała muzyki relaksacyjnej. Efekt wzrostu nie trwał jednak dłużej niż 10–15 minut, a sami autorzy badania w późniejszej publikacji (Rauscher, Hinton, 2006), stwierdzili, że tylko nauka gry na instrumencie muzycznym, a nie bierne słuchanie,

może wspierać rozwój poznawczy. Wyników tego badania (Rauscher, Shaw, Ky, 1993) nie udało się już zreplikować innym badaczom.

Pomimo pewnej ostrożności w wyciąganiu wniosków o możliwym pozytywnym wpływie nauki gry na instrumencie muzycznym na rozwój zdolności pozamuzycznych wyniki neuroobrazowe wskazujące na zmiany strukturalne sugerują, że długoterminowe programy interwencyjne mogą wspierać neuroplastyczność u dzieci. Innymi słowy, interwencja oparta na nauce gry na instrumencie muzycznym może mieć szczególne znaczenie zarówno w przypadku dzieci z zaburzeniami rozwoju, jak i dorosłych z chorobami neurologicznymi.

## MUZYCZNE ODZIAŁYWANIA TERAPEUTYCZE

Słuchanie muzyki jest doświadczeniem uniwersalnym. Słuchamy muzyki, żeby się zrelaksować, aby wzmocnić koncentrację, np. podczas pracy, czy aby wprowadzić się w lepszy nastrój. Muzyka bez wątpienia odgrywa ważną rolę społeczną i kulturalną oraz dla wielu jest źródłem przyjemności i nagrody (Salimpoor, Zatorre, 2013). Co ciekawe, już samo wystukiwanie palcem czy słuchanie rytmu pobudza w mózgu obszary zaangażowane w procesy społeczno-emocjonalne (Trost i in., 2012). Metaanaliza (Gaudette-Leblanc i in., 2021) wyników badań dotycząca zależności pomiędzy stosowaniem ćwiczeń muzycznych dla najmłodszych dzieci (w wieku 0–6 lat) a ich rozwojem społeczno-emocjonalnym wykazała pozytywny związek. Ponadto zajęcia muzyczne okazują się wspierać rozwój umiejętności społecznych u dzieci z zaburzeniami ze spektrum autyzmu (Dahary i in., 2022; Pasqualotto i in., 2021). Wyniki wielu badań potwierdzają, że muzykoterapia, w tym słuchanie relaksacyjnej muzyki, wpływa pozytywnie na zdolność regulacji emocji, poprawia zachowanie dzieci i młodzieży, które doświadczyły traumy, a także sprzyja rozwojowi kompetencji społecznych czy poprawia ich wyniki w nauce (McFerran i in., 2020). Ponadto słuchanie muzyki oddziałuje pozytywnie na stan psychiczny dzieci i dorosłych z zespołem stresu pourazowego (PTSD) (Wang i in., 2024) oraz zmniejsza napięcie emocjonalne i nasilenie lęku (Nilsson, 2008). Powyższe wyniki popierają dane neuroobrazowe, które dostarczają dowodów,

że słuchanie muzyki zmniejsza aktywność ciała migdałowatego (*amygdala*) (Koelsh, 2014), struktury utożsamianej z emocją strachu i złości (LeDoux, 2003) oraz pobudza obszary związane z nagrodą, zarówno u dzieci (Fasano i in., 2022) jak i dorosłych (Vuust i in., 2022).

Wiedza pochodząca z badań neuroobrazowych, dotycząca wpływu treningu muzycznego na funkcjonowanie człowieka, daje także możliwość jego zastosowania w kontekście klinicznym (Agres i in., 2021). Na przykład terapia z wykorzystaniem intonacji i rytmu okazała się wspierać rehabilitację osób z afazją Broki, w której uszkodzenie lewej kory czołowej prowadzi do zaburzenia ekspresji mowy (Schlaug, Marchina i Norton, 2010). W trakcie tej terapii pacjent uczony jest wypowiadać słowa w sposób śpiewny, przy jednoczesnym wystukiwaniu sylab, np. mu-zy-ka. Zakłada się, że poprzez śpiew, który angażuje nienaruszone obszary prawej półkuli (homologiczne do uszkodzonych obszarów lewej półkuli) oraz poprzez jednoczesne stukanie prawą ręką, która angażuje korę ruchową lewej półkuli, dochodzi do wzmacniania połączeń słuchowo-ruchowych, co przygotowuje obszary motoryczne do artykulacji. Wyniki innych badań sugerują, że nawet bierna ekspozycja na muzykę ma korzystny wpływ na pamięć i nastrój u pacjentów po udarze mózgu (Särkämö i in., 2008). Trening muzyczny okazał się również skuteczną metodą rehabilitacji niedowładów kończyn po udarze mózgu. W jednym z badań wykorzystano elektroniczny zestaw perkusyjny do ćwiczenia ramion oraz pianino MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*) do treningu niedowładów dłoni (Schneider i in., 2007). W porównaniu z grupą kontrolną, którą poddano wyłącznie fizjoterapii, u pacjentów z grupy muzycznej zanotowano poprawę w zakresie ruchu kończyn z niedowładem, co określono na podstawie wykonania standardowych testów. Co ważne, testy te nie miały charakteru muzycznego, co wskazuje na przeniesienie nabytych umiejętności motorycznych związanych z grą na instrumencie, na inne, codzienne czynności. Wyniki innych badań osób po udarze mózgu sugerują, że rehabilitacja ruchowa z wykorzystaniem elementów treningu muzycznego wspiera procesy reorganizacji kory ruchowej (Altenmüller i in., 2009) i zwiększa funkcjonalną łączność pomiędzy obszarami słuchowymi i ruchowymi (Rodriguez-Fornells i in., 2012). Można także założyć, że inne aspekty terapii muzycznej, takie jak przyjemność z udziału w sesji terapeutycznej, zwiększona motywacja do ćwiczeń, a także społeczne aspekty

interakcji podczas np. śpiewania i tworzenia muzyki, przyczyniają się do skuteczności omówionych oddziaływań. Zauważono bowiem, że reorganizacja kory zachodzi także poprzez układ nagrody, w szczególności monoaminy, których modulujący wpływ na plastyczność korową wykazano w modelach zwierzęcych, a w pewnym stopniu także u ludzi (Thiel, 2007).

Zmiany neuroplastyczne, zależne od doświadczenia jednostki, mogą zachodzić przez całe życie i – jak dowodzą wyniki badań neuroobrazowych – także w okresie starzenia (Arcos-Burgos i in., 2019). Zaobserwowano, że doświadczenie muzyczne pozwala osobom starszym przez dłuższy czas zachować sprawną pamięć operacyjną oraz zdolność rozumienia mowy w hałaśliwym otoczeniu (Parbery-Clark i in., 2011). Podobnie u profesjonalnych muzyków wraz z wiekiem zachodzi wolniejsze pogorszenie funkcji wykonawczych (Hanna-Pladdy, MacKay, 2011), chociaż w tym przypadku nie można całkowicie wykluczyć udziału takich czynników jak pochodzenie społeczno-ekonomiczne czy inteligencja. Wydaje się także, że programy interwencyjne wykorzystujące ćwiczenia fizyczne wykonywane przy akompaniamencie muzyki mogą także przynieść poprawę funkcji poznawczych u pacjentów z demencją (Van de Winckel i in., 2004) czy chorobą Parkinsona (Pacchetti i in., 2000). Wyniki te stanowią obiecującą podstawę do dalszych badań nad mechanizmami plastyczności związanej z treningiem u osób starzejących się i chorobami uwarunkowanymi wiekiem.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Prowadzone badania wskazują, że różnego rodzaju treningi, takie jak nauka zonglowania, gry komputerowe czy gra w golfa indukują procesy neuroplastyczne w mózgu człowieka (Lövdén i in., 2013). Jednak to nauka gry na instrumencie muzycznym, dzięki jednoczesnemu zaangażowaniu zarówno systemów sensorycznych, układu motorycznego, jak również obszarów odpowiedzialnych za wyższe funkcje poznawcze, ma szczególnie pozytywny wpływ na mózg człowieka. Chociaż wpływ ten, zarówno na poziomie funkcji, jak i struktury mózgu, w największym stopniu obserwowany jest w okresie rozwoju, to ma miejsce także w okresie dorosłości oraz u osób starszych. Uwzględniając wyniki badań, które potwierdzają pozytywny wpływ treningów muzycznych

na rozwój dziecka, w tym rozwój mowy, funkcji wykonawczych czy rozwój społeczno-emocjonalny, wydaje się konieczne, aby wszystkim dzieciom zapewnić możliwość edukacji muzycznej (Kraus, Chandrasekaran, 2010).

W przyszłych badaniach zapewne istotne będzie uwzględnienie różnic międzyosobniczych, co pozwoli na oddzielenie czynników predysponujących do nauki gry na instrumencie muzycznym od ogólnych mechanizmów plastyczności mózgu. Tym samym możliwe stanie się dostosowanie rodzaju treningu czy formy rehabilitacji indywidualnie dla każdej osoby w celu optymalnego wykorzystania potencjału uczenia się i plastyczności mózgu. Na zakończenie warto dodać, że chociaż badania neuroobrazowe nie pozwalają na bezpośrednie powiązanie obserwowanych zmian z różnorodnymi mechanizmami na poziomie komórkowym i molekularnym, co zapewniają badania zwierząt (Hyde i in., 2009), to wydaje się jednak, że pojawiające się wzorce zmian na skutek treningu muzycznego u ludzi można porównać z mechanizmami plastyczności, które identyfikuje się w bardziej podstawowych badaniach eksperymentalnych, tj. modelach zwierzęcych i biologii komórkowej.

## ENDNOTES

- [1] EEG to nieinwazyjna metoda diagnostyczna do badania bioelektrycznej czynności mózgu.
- [2] W badaniu fMRI istotą pomiaru jest zobrazowanie najbardziej aktywnych obszarów mózgu, do których w wyniku np. wykonywania zadania dostarczana jest większa ilość krwi zawierającej tlen (tzw. sygnał BOLD, *blood-oxygen-level-dependent*).
- [3] W przypadku pomiarów kory mózgu, tj. istoty szarej, wykorzystuje się technikę określaną jako VBM (*voxel based morphometry*), która obrazuje grubość kory (liczbę połączeń neuronalnych).
- [4] Obrazowanie tensorowe dyfuzji (*diffusion tensor imaging*, DTI) umożliwia zobrazowanie istoty białej na podstawie stopnia i kierunku dyfuzji cząsteczek wody we włóknach aksonalnych (anizotropia frakcyjna, FA). Niski współczynnik FA odzwierciedla niższą integralność istoty białej i prawdopodobnie mniej wydajne przekazywanie informacji pomiędzy strukturami mózgu.
- [5] Metoda Suzuki tworzona przez japońskiego skrzypka Shinichi Suzuki (1898–1998) w latach 40. – 50. XX w. W jej założeniu dzieci w wieku 3–5 lat uczą się gry na instrumencie wyłącznie poprzez aktywne słuchanie oraz naśladowanie innych grających.

## REFERENCES

- Agres, K.R., Schaefer, R.S., Volk, A., van Hooren, S., Holzapfel, A., Dalla Bella, S., Müller, M., de Witte, M., Herremans, D., Ramirez Melendez, R., Neerinx, M., Ruiz, S., Meredith, D., Dimitriadis, T. & Magee, W.L. (2021). Music, Computing, and Health: A Roadmap for the Current and Future Roles of Music Technology for Health Care and Well-Being. *Music and Science*, 4, <https://doi.org/10.1177/2059204321997709>
- Allan, N.P., Hume, L.E., Allan, D.M., Farrington, A.L. & Lonigan, C.J. (2014). Relations between inhibitory control and the development of academic skills in preschool and kindergarten: A meta-analysis. *Developmental Psychology*, 50(10), <https://doi.org/10.1037/a0037493>
- Allom, V., Mullan, B. & Hagger, M. (2016). Does inhibitory control training improve health behaviour? A meta-analysis. *Health Psychology Review*, 10(2). <https://doi.org/10.1080/17437199.2015.1051078>
- Altenmüller, E., Marco-Pallares, J., Münte, T.F. & Schneider, S. (2009). Neural reorganization underlies improvement in stroke-induced motor dysfunction by music-supported therapy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04580.x>
- Anvari, S.H., Trainor, L.J., Woodside, J. & Levy, B.A. (2002). Relations among musical skills, phonological processing, and early reading ability in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 83(2). [https://doi.org/10.1016/S0022-0965\(02\)00124-8](https://doi.org/10.1016/S0022-0965(02)00124-8)
- Arcos-Burgos M., Lopera F., Sepulveda-Falla D. & Mastronardi C. (2019). *Neural Plasticity during Aging*. *Neural Plast.* Mar 26; 2019:6042132, doi: 10.1155/2019/6042132.
- Atterbury, B.W. (1985). Musical differences in learning-disabled and normal-achieving readers, aged seven, eight and nine. *Psychology of Music*, 13(2), <https://doi.org/10.1177/0305735685132005>
- Bangert, M. & Altenmüller, E.O. (2003). Mapping perception to action in piano practice: A longitudinal DC-EEG study. *BMC Neuroscience*, 4, <https://doi.org/10.1186/1471-2202-4-26>
- Bangert, M., Peschel, T., Schlaug, G., Rotte, M., Drescher, D., Hinrichs, H., Heinze, H.J. & Altenmüller, E. (2006). Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: Evidence from fMRI conjunction. *NeuroImage*, 30(3), <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.10.044>
- Bangert, M. & Schlaug, G. (2006). Specialization of the specialized in features of external human brain morphology. *European Journal of Neuroscience*, 24(6), <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.05031.x>
- Bangerter, A. & Heath, C. (2004). The Mozart effect: Tracking the evolution of a scientific legend. *British Journal of Social Psychology*, 43(4), <https://doi.org/10.1348/0144666042565353>
- Baumann, S., Koeneke, S., Schmidt, C.F., Meyer, M., Lutz, K. & Jancke, L. (2007). A network for audio-motor coordination in skilled pianists and non-musicians. *Brain Research*, 1161(1), <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.05.045>



- Bergman Nutley, S., Darki, F. & Klingberg, T. (2014). Music practice is associated with development of working memory during childhood and adolescence. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(JAN). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00926>
- Bermudez, P. & Zatorre, R.J. (2005). Differences in gray matter between musicians and nonmusicians. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060, <https://doi.org/10.1196/annals.1360.057>
- Bolduc, J., Gosselin, N., Chevrette, T. & Peretz, I. (2021). The impact of music training on inhibition control, phonological processing, and motor skills in kindergarteners: a randomized control trial. *Early Child Development and Care*, 191(12), <https://doi.org/10.1080/03004430.2020.1781841>
- Bramwell-Dicks, A.F. (2016). *Music While You Work: The Effect of Music on Typing Performance and Experience*. PhD thesis, University of York.
- Brandt, A., Gebrian, M. & Slevc, L.R. (2012). Music and early language acquisition. *Frontiers in Psychology*, 3(SEP), <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00327>
- Buccino, G., Vogt, S., Ritzl, A., Fink, G.R., Zilles, K., Freund, H.J. & Rizzolatti, G. (2004). Neural circuits underlying imitation learning of hand actions: An event-related fMRI study. *Neuron*, 42(2). [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(04\)00181-3](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(04)00181-3)
- Bugos, J.A. & Demarie, D. (2017). The effects of a short-term music program on preschool children's executive functions. *Psychology of Music*, 45(6), <https://doi.org/10.1177/0305735617692666>
- Chan, A.S., Ho, Y.C. & Cheung, M.C. (1998). Music training improves verbal memory [7]. *In Nature*, 396(6707), <https://doi.org/10.1038/24075>
- Cheek, J.M. & Smith, L.R. (1999). Music training and mathematics achievement. *Adolescence*, 34(136).
- Chen, J.L., Penhune, V.B. & Zatorre, R.J. (2008). Moving on time: Brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and musical training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(2), <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20018>
- Costa-Giomi, E. (1999). The effects of three years of piano instruction on children's cognitive development. *Journal of Research in Music Education*, 47(3), <https://doi.org/10.2307/3345779>
- Dahary, H., Rimmer, C., Kaedbey, M. & Quintin, E.M. (2023). A Systematic Review of Shared Social Activities for Children on the Autism Spectrum and Their Peers. *In Review Journal of Autism and Developmental Disorders*, 10(4), <https://doi.org/10.1007/s40489-022-00322-w>
- Degé, F. & Frischen, U. (2022). The impact of music training on executive functions in childhood – a systematic review. *Zeitschrift Fur Erziehungswissenschaft*, 25(3), <https://doi.org/10.1007/s11618-022-01102-2>
- Doyon, J., Bellec, P., Amsel, R., Penhune, V., Monchi, O., Carrier, J., Lehericy, S. & Benali, H. (2009). Contributions of the basal ganglia and functionally related brain structures to motor learning. *In Behavioural Brain Research*, 199(1), <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.11.012>

- Fasano, M.C., Cabral, J., Stevner, A., Vuust, P., Cantou, P., Brattico, E. & Kringelbach, M.L. (2023). The early adolescent brain on music: Analysis of functional dynamics reveals engagement of orbitofrontal cortex reward system. *Human Brain Mapping*, 44(2), <https://doi.org/10.1002/hbm.26060>
- Fogel, A., McCrickerd, K., Goh, A.T., Fries, L.R., Chong, Y.S., Tan, K.H., Yap, F., Shek, L.P., Meaney, M. J., Cai, S., Silveira, P.P., Broekman, B.F.P., Lee, Y.S., Godfrey, K.M., Chong, M.F.F. & Forde, C.G. (2019). Associations between inhibitory control, eating behaviours and adiposity in 6-year-old children. *International Journal of Obesity*, 43(7), <https://doi.org/10.1038/s41366-019-0343-y>
- Folland, N.A., Butler, B.E., Smith, N.A. & Trainor, L.J. (2012). Processing simultaneous auditory objects: Infants' ability to detect mistuning in harmonic complexes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), <https://doi.org/10.1121/1.3651254>
- Foster, N.E.V. & Zatorre, R.J. (2010). Cortical structure predicts success in performing musical transformation judgments. *NeuroImage*, 53(1), <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.06.042>
- Friederici, A.D. (2009). Pathways to language: fiber tracts in the human brain. *In Trends in Cognitive Sciences* 13(4), <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.01.001>
- Frischen, U., Schwarzer, G. & Degé, F. (2019). Comparing the Effects of Rhythm-Based Music Training and Pitch-Based Music Training on Executive Functions in Preschoolers. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 13, <https://doi.org/10.3389/fnint.2019.00041>
- Fujioka, T., Ross, B., Kakigi, R., Pantev, C. & Trainor, L.J. (2006). One year of musical training affects development of auditory cortical-evoked fields in young children. *Brain*, 129(10), <https://doi.org/10.1093/brain/awl247>
- Gaser, C. & Schlaug, G. (2003). Brain structures differ between musicians and non-musicians. *Journal of Neuroscience*, 23(27), <https://doi.org/10.1523/jneurosci.23-27-09240.2003>
- Gaudette-Leblanc, A., Boucher, H., Bédard-Bruyère, F., Pearson, J., Bolduc, J. & Tarabulsy, G.M. (2021). Participation in an early childhood music programme and socioemotional development: A meta-analysis. *International Journal of Music in Early Childhood*, 16(2), [https://doi.org/10.1386/ijmec\\_00032\\_1](https://doi.org/10.1386/ijmec_00032_1)
- Gizzi, G. & Albi, E. (2017). The music in the brain hemispheres. *The EuroBiotech Journal*, 1(4), 259–263. <https://doi.org/10.24190/issn2564-615x/2017/04.01>
- Grefkes, C. & Fink, G.R. (2005). The functional organization of the intraparietal sulcus in humans and monkeys. *In Journal of Anatomy*, 207(1), <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2005.00426.x>
- Gruber, H., Jansen, P., Marienhagen, J. & Altenmueller, E. (2010). Adaptations During the Acquisition of Expertise Expertise: Mental and Physical Excellence. *Talent Development & Excellence*, 2(1).
- Guhn, M., Emerson, S.D. & Gouzouasis, P. (2020). A Population-Level Analysis of Associations Between School Music Participation and Academic Achievement. *Journal of Educational Psychology*, 112(2), <https://doi.org/10.1037/edu0000376>

- Habib, M. & Besson, M. (2009). What do music training and musical experience teach us about brain plasticity? *Music Perception*, 26(3), <https://doi.org/10.1525/mp.2009.26.3.279>
- Habib, M., Lardy, C., Desiles, T., Commeiras, C., Chobert, J. & Besson, M. (2016). Music and dyslexia: A new musical training method to improve reading and related disorders. *Frontiers in Psychology*, 7(JAN). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00026>.
- Hanna-Pladdy, B. & MacKay, A. (2011). The Relation Between Instrumental Musical Activity and Cognitive Aging. *Neuropsychology*, 25(3), <https://doi.org/10.1037/a0021895>
- He, C. & Trainor, L.J. (2009). Finding the pitch of the missing fundamental in infants. *Journal of Neuroscience*, 29(24), <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0157-09.2009>
- Herholz, S.C. & Zatorre, R.J. (2012). Musical Training as a Framework for Brain Plasticity: Behavior, Function, and Structure. *In Neuron*, 76(3), <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.10.011>
- Heyes, C. (2001). Causes and consequences of imitation. *In Trends in Cognitive Sciences*, 5(6), [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01661-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01661-2)
- Hikosaka, O., Nakamura, K., Sakai, K. & Nakahara, H. (2002). Central mechanisms of motor skill learning. *In Current Opinion in Neurobiology*, 12(2), [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(02\)00307-0](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(02)00307-0)
- Ho, Y.C., Cheung, M.C. & Chan, A.S. (2003). Music training improves verbal but not visual memory: Cross-sectional and longitudinal explorations in children. *Neuropsychology*, 17(3), <https://doi.org/10.1037/0894-4105.17.3.439>
- Hyde, K.L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A.C. & Schlaug, G. (2009). Musical training shapes structural brain development. *Journal of Neuroscience*, 29(10), 3019–3025, <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5118-08.2009>
- Jamey, K., Foster, N.E. v., Hyde, K.L. & Bella, S.D. (2023). *Does Music Training Improve Inhibition Control in Children? A Systematic Review and Meta-Analysis*. BioRxiv.
- Jaschke, A.C., Honing, H. & Scherder, E.J.A. (2018). Longitudinal Analysis of Music Education on Executive Functions in Primary School Children. *Frontiers in Neuroscience*, 12, <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00103>
- Koelsch, S. (2014). Brain correlates of music-evoked emotions. *In Nature Reviews Neuroscience*, 15(3), <https://doi.org/10.1038/nrn3666>
- Koelsch, S., Gunter, T., Friederici, A.D. & Schröger, E. (2000). Brain indices of music processing: „Nonmusicians” are musical. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(3), <https://doi.org/10.1162/089892900562183>
- Kong, J., Wang, C., Kwong, K., Vangel, M., Chua, E. & Gollub, R. (2005). The neural substrate of arithmetic operations and procedure complexity. *Cognitive Brain Research*, 22(3), <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.09.011>
- Kossut, M. (2019). Basic mechanism of neuroplasticity. *Neuropsychiatria i Neuropsychologia*, 14(1–2), 1–8, <https://doi.org/10.5114/nan.2019.87727>

- Kraus, N. & Chandrasekaran, B. (2010). Music training for the development of auditory skills. *In Nature Reviews Neuroscience*, 11(8), <https://doi.org/10.1038/nrn2882>.
- Kuhl, P.K. (2010). Brain Mechanisms in Early Language Acquisition. *In Neuron*, 67(5), <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.08.038>
- Lamb, S.J. & Gregory, A.H. (1993). The Relationship between Music and Reading in Beginning Readers. *Educational Psychology*, 13(1), <https://doi.org/10.1080/0144341930130103>
- Lappe, C., Herholz, S.C., Trainor, L.J. & Pantev, C. (2008). Cortical plasticity induced by short-term unimodal and multimodal musical training. *Journal of Neuroscience*, 28(39), <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2254-08.2008>
- LeDoux, J. (2003). The emotional brain, fear, and the amygdala. *In Cellular and Molecular Neurobiology*, 23(4–5), <https://doi.org/10.1023/A:1025048802629>
- Lövdén, M., Wenger, E., Mårtensson, J., Lindenberger, U. & Bäckman, L. (2013). Structural brain plasticity in adult learning and development. *In Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 37(9), <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.02.014>
- Margulis, E.H., Mlsna, L.M., Uppunda, A.K., Parrish, T.B. & Wong, P.C.M. (2009). Selective neurophysiologic responses to music in instrumentalists with different listening biographies. *Human Brain Mapping*, 30(1), <https://doi.org/10.1002/hbm.20503>
- McFerran, K.S., Lai, H.I.C., Chang, W.-H., Acquaro, D., Chin, T.C., Stokes, H. & Croke, A.H.D. (2020). Music, Rhythm and Trauma: A Critical Interpretive Synthesis of Research Literature. *Frontiers in Psychology*, 11, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00324>
- Nilsson, U. (2008). The Anxiety – and Pain-Reducing Effects of Music Interventions: A Systematic Review. *AORN Journal*, 87(4), <https://doi.org/10.1016/j.aorn.2007.09.013>
- Olszewska, A.M., Gaca, M., Herman, A.M., Jednoróg, K. & Marchewka, A. (2021). How Musical Training Shapes the Adult Brain: Predispositions and Neuroplasticity. *In Frontiers in Neuroscience*, 15, <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.630829>
- Pacchetti, C., Mancini, F., Aglieri, R., Fundaró, C., Martignoni, E. & Nappi, G. (2000). Active music therapy in Parkinson's disease: An integrative method for motor and emotional rehabilitation, *Psychosomatic Medicine*, 62(3), <https://doi.org/10.1097/00006842-200005000-00012>
- Pantev, C., Roberts, L.E., Schulz, M., Engelien, A. & Ross, B. (2001). Timbre-specific enhancement of auditory cortical representations in musicians. *NeuroReport*, 12(1), <https://doi.org/10.1097/00001756-200101220-00041>
- Parbery-Clark, A., Strait, D.L., Anderson, S., Hittner, E. & Kraus, N. (2011). Musical experience and the aging auditory system: Implications for cognitive abilities and hearing speech in noise. *PLoS ONE*, 6(5), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018082>
- Pascual-Leone, A., Grafman, J. & Hallett, M. (1994). Modulation of cortical motor output maps during development of implicit and explicit knowledge. *Science*, 263(5151), <https://doi.org/10.1126/science.8122113>

- Pasqualotto, A., Mazzoni, N., Bentenuto, A., Mulè, A., Benso, F. & Venuti, P. (2021). Effects of cognitive training programs on executive function in children and adolescents with autism spectrum disorder: A systematic review. *In Brain Sciences*, 11(10), <https://doi.org/10.3390/brainsci11101280>
- Penhune, V.B. & Steele, C.J. (2012). Parallel contributions of cerebellar, striatal and M1 mechanisms to motor sequence learning. *In Behavioural Brain Research*, 226(2), <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2011.09.044>
- Rauscher, F.H. & Hinton, S.C. (2006). The Mozart effect: Music listening is not music instruction. *In Educational Psychologist*, 41(4), [https://doi.org/10.1207/s15326985ep4104\\_3](https://doi.org/10.1207/s15326985ep4104_3)
- Rauscher, F.H., Shaw, G.L. & Ky, C.N. (1993). Music and spatial task performance [6]. *In Nature*, 365(6447), <https://doi.org/10.1038/365611a0>
- Rizzolatti, G., Fogassi, L. & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(9), <https://doi.org/10.1038/35090060>
- Rodriguez-Fornells, A., Rojo, N., Amengual, J.L., Ripollés, P., Altenmüller, E. & Münte, T.F. (2012). The involvement of audio-motor coupling in the music-supported therapy applied to stroke patients. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1252(1), <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06425.x>
- Rodriguez-Gomez, D.A. & Talero-Gutiérrez, C. (2022). Effects of music training in executive function performance in children: A systematic review. *In Frontiers in Psychology*, 13, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.968144>
- Rymarczyk, K., Zurawski, L., Jankowiak-Siuda, K. & Szatkowska, I. (2018). Neural correlates of facial mimicry: Simultaneous measurements of EMG and BOLD responses during perception of dynamic compared to static facial expressions. *Frontiers in Psychology*, 9(FEB), <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00052>
- Rymarczyk, K., Zurawski, L., Jankowiak-Siuda, K. & Szatkowska, I. (2019). Empathy in facial mimicry of fear and disgust: Simultaneous EMG-fMRI recordings during observation of static and dynamic facial expressions. *Frontiers in Psychology*, 10(MAR), <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00701>
- Saffran, J.R., Aslin, R.N. & Newport, E.L. (1996). Statistical learning by 8-month-old infants. *Science*, 274(5294), <https://doi.org/10.1126/science.274.5294.1926>
- Salimpoor, V.N., & Zatorre, R.J. (2013). Neural interactions that give rise to musical pleasure. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 7(1), <https://doi.org/10.1037/a0031819>
- Särkämö, T., Tervaniemi, M., Laitinen, S., Forsblom, A., Soinila, S., Mikkonen, M., Autti, T., Silvennoinen, H.M., Erkkilä, J., Laine, M., Peretz, I. & Hietanen, M. (2008). Music listening enhances cognitive recovery and mood after middle cerebral artery stroke. *Brain*, 131(3), <https://doi.org/10.1093/brain/awn013>
- Schellenberg, E.G. (2004). Music lessons enhance IQ. *Psychological Science*, 15(8), <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00711.x>

- Schlauffke, L., Friedrich, S., Tegenthoff, M., Güntürkün, O., Genç, E. & Ocklenburg, S. (2020). Boom Chack Boom – A multimethod investigation of motor inhibition in professional drummers. *Brain and Behavior*, 10(1), <https://doi.org/10.1002/brb3.1490>
- Schlaug, G., Forgeard, M., Zhu, L., Norton, A., Norton, A. & Winner, E. (2009). Training-induced neuroplasticity in young children. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 205–208, <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04842.x>
- Schlaug, G., Jäncke, L., Huang, Y., Staiger, J.F. & Steinmetz, H. (1995). Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia*, 33(8), [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(95\)00045-5](https://doi.org/10.1016/0028-3932(95)00045-5)
- Schlaug, G., Norton, A., Marchina, S., Zipse, L. & Wan, C.Y. (2010). From singing to speaking: Facilitating recovery from nonfluent aphasia. *In Future Neurology*, 5(5), <https://doi.org/10.2217/fnl.10.44>
- Schlaug, G., Norton, A., Overy, K. & Winner, E. (2005). Effects of music training on the child's brain and cognitive development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060, 219–230, <https://doi.org/10.1196/annals.1360.015>
- Schmithorst, V.J. & Wilke, M. (2002). Differences in white matter architecture between musicians and non-musicians: A diffusion tensor imaging study. *Neuroscience Letters*, 321(1–2), [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(02\)00054-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(02)00054-X)
- Schneider, P., Scherg, M., Dosch, H.G., Specht, H.J., Gutschalk, A. & Rupp, A. (2002). Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nature Neuroscience*, 5(7), <https://doi.org/10.1038/nn871>
- Schneider, S., Schönle, P.W., Altenmüller, E. & Münte, T.F. (2007). Using musical instruments to improve motor skill recovery following a stroke. *Journal of Neurology*, 254(10), <https://doi.org/10.1007/s00415-006-0523-2>
- Shahin, A., Bosnyak, D.J., Trainor, L.J. & Roberts, L.E. (2003). Enhancement of neuroplastic P2 and N1c auditory evoked potentials in musicians. *Journal of Neuroscience*, 23(13), <https://doi.org/10.1523/jneurosci.23-13-05545.2003>
- Steele, C.J., Bailey, J.A., Zatorre, R.J. & Penhune, V.B. (2013). Early musical training and white-matter plasticity in the corpus callosum: Evidence for a sensitive period. *Journal of Neuroscience*, 33(3), <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3578-12.2013>
- Stewart, L., Henson, R., Kampe, K., Walsh, V., Turner, R. & Frith, U. (2003). Brain changes after learning to read and play music. *NeuroImage*, 20(1), [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00248-9](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00248-9)
- Strait, D.L., Chan, K., Ashley, R. & Kraus, N. (2012). Specialization among the specialized: Auditory brainstem function is tuned in to timbre. *In Cortex*, 48(3), <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.03.015>
- Thiel, C.M. (2007). Pharmacological modulation of learning-induced plasticity in human auditory cortex. *In Restorative Neurology and Neuroscience*, 25(3–4).
- Tierney, A. & Kraus, N. (2013). Music training for the development of reading skills. *In Progress in Brain Research*, 207, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63327-9.00008-4>.
- Tillmann, B., Koelsch, S., Escoffier, N., Bigand, E., Lalitte, P., Friederici, A.D. & von Cramon, D.Y. (2006). Cognitive priming in sung and instrumental music:

- Activation of inferior frontal cortex, *NeuroImage*, 31(4), <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.02.028>
- Toiviainen, P. & Krumhansl, C.L. (2003). Measuring and modeling real-time responses to music: The dynamics of tonality induction. *Perception*, 32(6), <https://doi.org/10.1068/p3312>
- Trost, W., Ethofer, T., Zentner, M. & Vuilleumier, P. (2012). Mapping aesthetic musical emotions in the brain. *Cerebral Cortex*, 22(12), <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr353>
- Tudor, L., Sikirić, P., Tudor, K.I., Cambi-Sapunar, L., Radonić, V., Tudor, M., Buca, A. & Carija, R. (2008). [Amusia and aphasia of Bolero's creator – influence of the right hemisphere on music]. *Acta Medica Croatica : Casopis Hrvatske Akademije Medicinskih Znanosti*, 62(3).
- Umejima, K., Flynn, S. & Sakai, K.L. (2024). Enhanced activations in the dorsal inferior frontal gyrus specifying the who, when, and what for successful building of sentence structures in a new language. *Scientific Reports*, 14(1), <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50896-6>
- van de Winckel, A., Feys, H., de Weerd, W. & Dom, R. (2004). Cognitive and behavioural effects of music-based exercises in patients with dementia. *Clinical Rehabilitation*, 18(3), <https://doi.org/10.1191/0269215504cr750oa>
- Wang, C.C., Emrich, M., Rives, H., Ovalles, A., Wright, D., Wyka, K. & Difede, J. (2024). Music interventions for posttraumatic stress disorder: A systematic review. *Journal of Mood & Anxiety Disorders*, 6, <https://doi.org/10.1016/j.xjmad.2024.100053>
- Wilkinson, H.R., Smid, C., Morris, S., Farran, E.K., Dumontheil, I., Mayer, S., Tolmie, A., Bell, D., Porayska-Pomsta, K., Holmes, W., Mareschal, D. & Thomas, M.S.C. (2020). Domain-Specific Inhibitory Control Training to Improve Children's Learning of Counterintuitive Concepts in Mathematics and Science. *Journal of Cognitive Enhancement*, 4(3), <https://doi.org/10.1007/s41465-019-00161-4>
- Wong, P.C.M., Skoe, E., Russo, N.M., Dees, T. & Kraus, N. (2007). Musical experience shapes human brainstem encoding of linguistic pitch patterns. *Nature Neuroscience*, 10(4), <https://doi.org/10.1038/nn1872>
- Zatorre, R.J., Chen, J.L. & Penhune, V.B. (2007). When the brain plays music: Auditory-motor interactions in music perception and production. *In Nature Reviews Neuroscience*, 8(7), <https://doi.org/10.1038/nrn2152>