

# The Effect of Music Training on Brain Plasticity during Critical Period

Xiaowen Hu

Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing  
Email: 1607863842@qq.com

Received: Dec. 27<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 14<sup>th</sup>, 2020; published: Jan. 21<sup>st</sup>, 2020

---

## Abstract

At present, with the development of cognitive neuroscience, more and more researchers pay attention to the effect of music training on brain structure and function, and actively explore the role of the critical period of individual development. How to grasp the opportunity of critical period and use music training to promote the development of brain structure and function with maximum efficiency has become a common task faced by brain scientists and educators. This study investigated the effects of music training on the brain regions of individual auditory system and motor system during the interaction with the critical period, and emphasized the importance of the critical period.

## Keywords

Music Training, Brain Plasticity, Auditory System, Motor System, Critical Period

---

## 关键期的音乐训练对大脑可塑性的影响

胡晓雯

西南大学心理学部, 重庆  
Email: 1607863842@qq.com

收稿日期: 2019年12月27日; 录用日期: 2020年1月14日; 发布日期: 2020年1月21日

---

## 摘 要

当前, 随着认知神经科学的深入发展, 越来越多的研究者关注音乐训练对大脑结构与功能的塑造作用, 并积极探寻个体发展的关键期在其中扮演的角色。如何抓住个体发展的关键期, 利用音乐训练最大效率

地促进大脑结构与功能的发育已经成为脑科学研究者与教育工作者共同面临的课题。本研究考察了音乐训练与关键期相互作用时,对个体听觉系统、运动系统的脑区产生的影响,强调了关键期的重要性。

## 关键词

音乐训练, 脑可塑性, 听觉系统, 运动系统, 关键期

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,随着认知神经科学的不断发展,音乐学习逐渐被纳入其研究领域,个体在从事音乐活动时需要涉及个体的感觉相关脑区、运动相关脑区以及多重感知通道的整合,例如,小提琴家在进行音乐演奏时必须运用一系列复杂的技巧,包括将乐谱的视觉信息转换为动作,使多感官信息与双手动作相协调,发展手指精细运动技能,并结合听觉反馈以便对演奏中的音乐进行调整,这个过程需要大脑多个脑区的广泛参与。而人类大脑作为一个动态、复杂的信息系统,除了能够对个体的认知与行为表现提供支持,其结构与功能以及化学物质等诸多方面均能因个体内外部因素而发生重新建构,这称之为脑的可塑性。也就是说,受学习、经验的影响,大脑会出现结构的变化与功能的重组。已有大量研究表明音乐训练会导致大脑结构与功能的变化(Boyke, Driemeyer, Gaser, Büchel, & May, 2008; Herdener et al., 2010; Klein, Liem, Hänggi, Elmer, & Jäncke, 2016),而这种变化存在关键期(Dahmen & King, 2007; Trainor, 2005)。关键期是发展的时期,在这一时期,特定的经历会增强对行为和大脑的长期影响,Knudsen (2004)认为关键期是神经回路特性出现的时间点,它反映了特定神经环路处于过渡状态时的发展特性,具有不稳定性,在个体发展和环境的相互作用下,处于关键期的个体对感官输入刺激具有较强的敏感性,因此,关键期是学习的最佳时机(Werker & Tees, 2010)。关键期的发现对于音乐训练的研究具有重大意义,如果在关键期内给予个体提供适宜的音乐训练环境,就能够最大效率地促进个体大脑的发展。

近年来,研究者致力于在音乐训练的关键期与脑神经科学之间寻找契合点,试图更好地检测与评估早期开始音乐训练对大脑的促进作用,试图为儿童的音乐教育和业余音乐训练提供证据。目前,行为与脑成像研究为音乐训练的关键期提供了可能性证据,与晚期开始音乐训练的音乐家相比,早期开始音乐训练的个体在大脑听觉系统与运动系统的结构与功能上存在显著优势。同时有关音乐训练关键期的研究大多采用横向研究,以具有丰富音乐训练经验的成年人作为研究对象,这是因为专业音乐家作为一个特殊群体,具有大量音乐训练与音乐演奏经验,他们通常在较早的年龄就开始从事高强度的音乐训练,同时他们的训练时间是可量化的,因此成为研究音乐训练关键期问题的理想研究模型(Steele et al., 2013)。

## 2. 音乐训练关键期与脑可塑性

### 2.1. 音乐训练关键期与听觉系统

众所周知,音乐是一种听觉艺术,音乐的表现手段如节奏、旋律、和声、音高等都是有组织的乐音,无论是对这些表现手段的聆听与感受,还是将其整合形成完整的乐曲进行演奏,个体的听觉系统都在其中扮演着至关重要的角色。因此,听觉系统成为音乐训练最能改变的系統之一。音乐训练对听觉系统的影响发生在听觉通路的各个阶段,包括听觉脑干(Wong, Erika, Russo, Tasha, & Nina, 2007),初级和周围的

听觉皮层(Patrick, Lerch, Evans, & Zatorre, 2009; Tarasenko et al., 2016)以及涉及高阶听觉认知的领域(Claudia, Herholz, Trainor, & Christo, 2008; Habibi, Cahn, Damasio, & Damasio, 2016)。那么,当音乐训练与个体发展的关键期相联系时,音乐训练在塑造个体听觉系统的结构和功能上如何发挥作用。

Pantev 等人(1998)采用磁共振成像技术来测量不同个体在聆听音乐材料时听觉皮层表征的差异,实验以具有绝对音高的音乐家、具有相对音高的音乐家以及普通人作为研究对象,以四个纯音(250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz 和 2000 Hz)和由钢琴弹奏的 C4, C5, C6 和 C7 为实验材料,结果发现,专业音乐家在聆听钢琴弹奏的音调时,听觉皮层产生的偶极矩(Dipole moment, 偶极矩是一对数值相等、符号相反的电荷彼此相隔的距离与电量之积,与其所代表的脑电流密度与总体强度成正比,偶极矩被认为是神经元活动总量的一个指标,偶极矩越大,则说明该脑区的激活程度越高),比聆听纯音时增大了 21%~28%,而普通人在聆听纯音和钢琴音时不存在偶极矩差异,这说明专业音乐家在聆听音乐材料时,听觉皮层神经激活的同步化更为明显,也就是说他们的听觉皮层有更多的神经元参与活动。同时研究发现,专业音乐家在聆听音乐材料时产生的平均偶极矩与个体开始学习音乐的年龄存在显著的线性负相关,在 9 岁之前开始音乐训练的音乐家其听觉皮质的活动显著增强,即训练开始的年龄越早,个体所产生的偶极矩越大,在识别音乐材料时的皮层重组也就越明显。这说明个体的听觉信息加工受到了影响,早期的音乐训练与个体听觉皮层结构发育和功能表征存在着密切联系。

个体的听觉脑干具有经验依赖可塑性,特定的听觉经验能够影响听觉脑干的发育与听觉信息的加工(Chandrasekaran & Kraus, 2010; Strait, Kraus, Parbery-Clark, & Ashley, 2010)。Skoe, Krizman 和 Kraus (2013)采用横向研究,以 770 名参与者为实验被试,其中 213 人被归类为音乐家,其他则被归类为普通人,其年龄在 0.25~72.41 岁之间,同时根据被试年龄将其分为 9 个组。实验刺激由五个共振峰(在声音的频谱中能量相对集中的一些区域)合成的/da/音,由一段高频能量(2500 Hz, 3500 Hz 和 4000 Hz)以及有声周期(基频为 103 Hz~125 Hz)组成,合成音/da/会产生 6 个特征峰(V, A, D, E, F, O, V 和 A 代表开始反应, D, E 和 F 出现在声音频率之后, O 代表结束反应),脑电研究结果发现,音乐家与普通人在 V 峰潜伏期,高频锁相以及反应一致性上存在显著差异,这说明音乐训练能够对个体听觉脑干的发展轨迹产生影响。听觉脑干至少具有两种不同的发展轨迹,一方面,听觉脑干反应的潜伏期和频率跟随反应有相似的发展时间线,会在儿童早期出现短暂的功能超调。另一方面,听觉脑干的反应一致性与非刺激活动表现出不同的发展时间线,峰值出现时间更晚(Skoe, Krizman, Anderson, & Kraus, 2015)。音乐训练并未加速或者改变听觉脑干的发展轨迹(Trainor, 2005),相反,音乐训练与个体听觉脑干的发展产生交互作用,使得听觉脑干的功能在相应的发育时间点上更为显著,这与以往的研究结果相一致(Patrick et al., 2009; Strait & Kraus, 2014)。5~14 岁是听觉脑干潜伏期与频率跟随反应的发展窗口,儿童在该时间段表现出更早的潜伏期与更大的反应波幅,其发育轨迹会短暂超过成年人。研究结果发现,越早开始音乐训练的个体其听觉脑干的反应越强烈,这说明音乐训练能够提供丰富的听觉经验,同时与个体发展的关键期相互作用,从而影响个体的听觉脑干的发育与信息处理。

此外,Skoe 等人对 45 名成年人进行了测试,并根据其自我报告的音乐训练时间长度将其分为三组:在儿童时期无音乐经验,在儿童时期持续 1~5 年或 6~11 年音乐训练的成年人,实验刺激为八种三角形波(基频分别为 262, 294, 330, 350, 370, 393, 416 和 440 Hz),利用电生理记录仪测量被试在聆听声音刺激时听觉脑干的反应差异,研究发现,儿童时期的音乐训练与成年人对声音的神经反应存在相关,与 9 岁左右开始演奏乐器并持续 1~5 或 6~11 年音乐训练的成年人相比,无音乐训练经验的成年人在听觉刺激反应后的脑干频率的波幅减小,表现为更小的脑干反应。这说明在儿童时期的音乐训练能够改变听觉系统的功能,并且这种改变具有持久性,能够维持到个体成年时期。

## 2.2. 关键期的音乐训练与运动系统

个体在从事音乐活动时(特别是乐器演奏时)会涉及某些特定的动作类型,需要不断地涉及手指以及上肢的动作,同时执行正确的运动序列,在这个过程中,个体会激活相应脑区的运动网络,各个脑区会做出相应的贡献,同时产生一定的结构与功能变化(Doyon et al., 2009),例如小提琴家在练习或者演奏音乐时,左手的第二到第五根手指(D2 到 D5)需要不断的拨动琴弦,手部区域将会得到更大程度的激活(Lotze, Scheler, Tan, Braun, & Birbaumer, 2003),因此,当音乐训练与关键期相结合时,相应地会对运动皮层的结构与功能产生影响。

在这个问题上,Elbert 等人(1995)采用磁性影像技术(Magnetic source imaging),以 9 名乐器演奏者作为实验组,其开始从事音乐训练的年龄在 7 岁~17 岁之间,同时以 6 名非音乐家作为对照组,对两组被试左右手指尖施以标准的、无疼痛感的躯体感觉刺激,研究同时将左手拇指(D1)和小指(D5)引起的等效电流偶极子被叠加到对照组大脑皮层的磁共振成像中,以提供解剖学的标志,解释基于 MEG 的定位。研究发现弦乐演奏者左手所对应的脑区激活范围较大,运动皮质代表区显著大于对照组,左手拇指和小指所对应的运动皮层的反应中心出现了偏移,偶极矩也显著增加,而偶极矩的增加与个体开始音乐训练的年龄存在显著负相关,在儿童时期开始音乐训练的个体其皮层的激活程度更大,这表明个体大脑的运动皮层在关键期对于外界刺激较为敏感,早期音乐训练对于儿童运动皮层的组织结构较为明显。

除了对运动皮层的激活存在影响外,Amunts 等人(1997)以专业钢琴家和非音乐家作为研究对象,探讨涉及长期的动作序列练习的音乐训练能否对个体手部表征脑区以及对个体的初级运动皮层产生影响,研究者测量了不同被试运动皮层中央前回的内沟长度(intrasulcal length of the precentral gurus, ILPG),并将其作为测量手部表征脑区与运动皮层面积大小的衡量标准。研究发现专业音乐家左右半球的 ILPG 差异显著小于非音乐家,具有更好的对称性,专业音乐家右侧的 ILPG 显著大于控制组,而左侧的 ILPG 与控制组并没有显著差异,这是因为音乐家个体需要更多地使用非优势手,因此右侧的 ILPG 显著较长,同时研究发现专业音乐家的初级运动皮质显著大于非音乐家,这是因为音乐家长期进行音乐练习,涉及双手手指动作训练,在这个过程中双手所对应的运动表征皮层得到了极大的锻炼与发展。该实验同样发现了音乐训练的关键期问题,研究发现开始音乐训练的时间早晚与 ILPG 的大小呈负相关,开始音乐训练的时间越早,ILPG 越大,这进一步说明音乐训练的关键期能够对个体的运动皮质产生功能性的影响以及长时间结构性的改变,该结论得到了其他研究的支持(Schlaug, 2001)。

Hyde 等人(2009)采用进一步明确了音乐训练的关键期对运动系统的塑造作用,他们以处于关键期的儿童作被试,利用基于形变的形态测量(deformation-based morphometry)探讨音乐训练对儿童大脑结构的影响。实验以 15 个平均年龄为 6.32 岁的儿童作为实验组,16 个平均年龄为 5.9 岁的儿童作为控制组,对实验组儿童进行 15 个月的乐器训练,结果显示,与控制组相比,实验组儿童的大脑形态发生了显著变化,运动皮层如右中央前回的体素显著较大,同时在手部动作序列的测试中,其行为表现显著优于控制组。该实验采用纵向研究,在行为与大脑层面直接验证了早期的音乐训练与运动皮层结构性变化的关系。Bailey & Penhune (2010)同样提供了证据,实验各选取了 15 名 7 岁之前(ET, early trained musician)和 7 岁之后开始音乐训练(LT, late-trained musician)的儿童作为研究对象,在确保两组被试的音乐训练时长无显著差异的条件下,测量两组运动皮层上是否具有差异,研究者利用体素分析技术(基于体素的优化形态测量、基于体素的传统形态测量、基于形变的形态测量以及基于表层的测量,包括皮质厚度、表面积和平均曲率)评估灰质结构的变化。基于形变的形态学分析结果发现 ET 组和 LT 组音乐家在右腹前运动皮层(vPMC, right ventral premotor cortex)的形变值存在组间差异,ET 组音乐家在该区域有更多的灰质,在行为表现上 ET 组音乐家在听觉运动同步任务上的行为表现显著优于 LT 组音乐家。此外,ET 组右腹前运

动皮层的面积显著大于 LT 组。这是因为早期的音乐训练能够促进右腹前运动皮层的发育变化,从而提高了音乐家在听觉运动同步任务上的表现。这与以往的理论解释相一致,在 6~9 岁时个体的运动皮质处于发展的重要时期(Gogtay & Thompson, 2010; Nitin et al., 2004),早期的音乐训练能够促进该区域的发育变化,而该区域的发展对个体动作发展,整合运动信息极为重要。

### 3. 讨论

已有研究从认知神经科学层面表明,可塑性是大脑神经系统的重要特性,贯穿个体生命的始终,音乐训练对个体大脑具有一定的塑造作用,而关键期在其中扮演着重要的角色。个体在从事乐器演奏等音乐活动时,不仅需要具备基本的乐理知识,包括弹奏乐器时的手部姿势,动作序列以及按键的力度等,此外,在演奏过程中,个体还需要将理论知识转换为实际的演奏动作,这需要感觉运动系统的高度整合,个体在刚开始演奏乐器时的手部动作缓慢且不熟练,但是随着训练的进行,个体伴随着视觉、听觉与动作的反馈逐渐调整自己的动作,最终个体可以精确地完成细小且复杂的演奏动作,这需要大脑听觉脑区、运动脑区等多个脑区的参与与配合,因此,长时间的音乐训练会对相应大脑的结构与功能产生广泛且积极的影响。在关键期内开始音乐训练的个体,能够更加有效地促进大脑的发育与塑造(Barrett, Ashley, Strait, & Kraus, 2013; Vaquero et al., 2016; Zatorre, 2013)。这是因为关键期是特定的经验与相关脑区成熟轨迹之间相互作用结果,音乐训练涉及的听觉和运动脑区的成熟轨迹大多遵循非线性生长曲线,初级运动皮质最先发育成熟,大概在 5 岁左右到达第一个发展高峰,而前运动皮层大概在 8.5 岁左右到达第一个发展峰值(Nitin et al., 2004),连接左右半球感觉运动皮质的胼胝体中后部在 6~8 岁会经历显著的发展变化(René et al., 2011)。这些脑区的成熟轨迹与关键期的音乐训练相互作用,进而对大脑的宏观结构与微观结构产生塑造作用。

需要知道的是,大脑可塑性具有终身性,其不仅仅发生在个体关键期,成年期与老年时期的大脑同样具有一定程度的可塑性,但是,关键期作为大脑发育重组的重要机会,对于个体未来的发展至关重要。当个体处于关键期时,其神经系统与行为模式尚未发育成熟,音乐训练所带来的丰富的听觉和运动经验可以诱发大脑产生巨大且持久性的改变,从这一层面上看,关键期的音乐训练已然成为了个体大脑发育与重组的重要机会,个体应当抓住这一“机会之窗”,最大效率地促进个体大脑的发展。

### 4. 结语与展望

综上所述,音乐训练关键期对于人脑发育与个体发展的重要作用已经逐步得到证实,因此,如何有效利用音乐训练的关键期去探索、开发、塑造个体大脑的结构与功能,已经成为我们不容回避的新课题。首先,我们应当重视音乐训练的关键期塑造个体大脑的作用,关键期作为个体发展的“机会之窗”,对于个体音乐技能的获得至关重要。大脑在关键期更容易受到经验学习等影响,从而对大脑的结构与功能产生塑造作用。脑科学工作者以及教育工作者应当努力寻求音乐训练关键期与个体大脑发展变化之间的最佳结合点,以便更好地指导音乐教育活动的展开,最大程度地开发大脑潜能。

其次,未来的音乐教育应当充分利用认知神经科学的研究成果,遵循脑科学发展规律,抓住发展的“机会之窗”,建立“基于脑、适于脑、促进脑”的音乐教育,为处于关键期的儿童提供适宜的音乐教学环境,让儿童充分接触发展所需要的刺激和经验,最大程度的让儿童的大脑得到开发与塑造。例如,在儿童音乐训练的关键期,为儿童提供各种乐器培训或者鼓励儿童参加各种音乐培训班学习,又或者在学校开展音乐训练课程,让儿童大脑进行大量的音乐刺激与训练,这对于个体未来的发展具有重要意义。

最后,在未来的研究工作中,我们需要更加积极地探寻音乐训练关键期对个体发展的塑造作用,为音乐教育实践提供更好的理论基础,探寻音乐训练应当在什么阶段、以什么内容、用什么方式展开,这需要音乐教育工作者与脑科学工作者的共同努力。

## 参考文献

- Amunts, K., Schlaug, G., Jäncke, L., Steinmetz, H., Schleicher, A., Dabringhaus, A., & Zilles, K. (1997). Motor Cortex and Hand Motor Skills: Structural Compliance in the Human Brain. *Human Brain Mapping*, 5, 206-215. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(1997\)5:3<206::AID-HBM5>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(1997)5:3<206::AID-HBM5>3.0.CO;2-7)
- Bailey, J. A., & Penhune, V. B. (2010). Rhythm Synchronization Performance and Auditory Working Memory in Early- and Late-Trained Musicians. *Experimental Brain Research*, 204, 91-101. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2299-y>
- Barrett, K. C., Ashley, R., Strait, D. L., & Kraus, N. (2013). Art and Science: How Musical Training Shapes the Brain. *Frontiers in Psychology*, 4, 713. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00713>
- Boyke, J., Driemeyer, J., Gaser, C., Büchel, C., & May, A. (2008). Training-Induced Brain Structure Changes in the Elderly. *Journal of Neuroscience*, 28, 7031-7035. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0742-08.2008>
- Chandrasekaran, B., & Kraus, N. (2010). The Scalp-Recorded Brainstem Response to Speech: Neural Origins and Plasticity. *Psychophysiology*, 47, 236-246. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00928.x>
- Claudia, L., Herholz, S. C., Trainor, L. J., & Christo, P. (2008). Cortical Plasticity Induced by Short-Term Unimodal and Multimodal Musical Training. *Journal of Neuroscience*, 28, 9632-9639. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2254-08.2008>
- Dahmen, J. C., & King, A. J. (2007). Learning to Hear: Plasticity of Auditory Cortical Processing. *Current Opinion in Neurobiology*, 17, 456-464. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.07.004>
- Doyon, J., Bellec, P. 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. *Behavioural Brain Research*, 199, 61-75. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.11.012>
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., & Taub, E. (1995). Increased Cortical Representation of the Fingers of the Left Hand in String Players. *Science*, 270, 305. <https://doi.org/10.1126/science.270.5234.305>
- Gogtay, N., & Thompson, P. M. (2010). Mapping Gray Matter Development: Implications for Typical Development and Vulnerability to Psychopathology. *Brain & Cognition*, 72, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.08.009>
- Habibi, A., Cahn, B. R., Damasio, A., & Damasio, H. (2016). Neural Correlates of Accelerated Auditory Processing in Children Engaged in Music Training. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 21, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.04.003>
- Herdener, M., Esposito, F., Salle, F. D., Boller, C., Hilti, C. C., Habermeyer, B., & Cattapanludewig, K. (2010). Musical Training Induces Functional Plasticity in Human Hippocampus. *Journal of Neuroscience the Official Journal of the Society for Neuroscience*, 30, 1377-1384. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4513-09.2010>
- Hyde, K. L., Jason, L., Andrea, N., Marie, F., Ellen, W., Evans, A. C., & Gottfried, S. (2009). Musical Training Shapes Structural Brain Development. *Journal of Neuroscience*, 29, 3019-3025. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5118-08.2009>
- Klein, C., Liem, F., Hänggi, J., Elmer, S., & Jäncke, L. (2016). The “Silent” Imprint of Musical Training. *Human Brain Mapping*, 37, 536-546. <https://doi.org/10.1002/hbm.23045>
- Knudsen, E. (2004). Sensitive Periods in the Development of the Brain and Behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 1412-1425. <https://doi.org/10.1162/0898929042304796>
- Lotze, M., Scheler, G., Tan, H. R. M., Braun, C., & Birbaumer, N. (2003). The Musician’s Brain: Functional Imaging of Amateurs and Professionals during Performance and Imagery. *Neuroimage*, 20, 1817-1829. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.07.018>
- Nitin, G., Giedd, J. N., Leslie, L., Hayashi, K. M., Deanna, G., A Catherine, V., Toga, A. W. et al. (2004). Dynamic Mapping of Human Cortical Development during Childhood through Early Adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101, 8174-8179. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>
- Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L. E., & Hoke, M. (1998). Increased Auditory Cortical Representation in Musicians. *Nature*, 392, 811-814. <https://doi.org/10.1038/33918>
- Patrick, B., Lerch, J. P., Evans, A. C., & Zatorre, R. J. (2009). Neuroanatomical Correlates of Musicianship as Revealed by Cortical Thickness and Voxel-Based Morphometry. *Cerebral Cortex*, 19, 1583. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn196>
- René, W., Eileen, L., Karsten, S., Ofte, S. H., Toga, A. W., Thompson, P. M., Kenneth, H. et al. (2011). Structural and Functional Reorganization of the Corpus Callosum between the Age of 6 and 8 Years. *Cerebral Cortex*, 21, 1012. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq165>
- Schlaug, G. (2001). The Brain of Musicians. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930, 281-299. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb05739.x>
- Skoe, E., Krizman, J., & Kraus, N. (2013). The Impoverished Brain: Disparities in Maternal Education Affect the Neural

- Response To sound. *Journal of Neuroscience*, 33(44), 17221-17231. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2102-13.2013>
- Skoe, E., Krizman, J., Anderson, S., & Kraus, N. (2015). Stability and Plasticity of Auditory Brainstem Function across the Lifespan. *Cerebral Cortex*, 25, 1415. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht311>
- 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 the Official Journal of the Society for Neuroscience*, 33, 1282. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3578-12.2013>
- Strait, D. L., & Kraus, N. (2014). Biological Impact of Auditory Expertise across the Life Span: Musicians as a Model of Auditory Learning. *Hearing Research*, 308, 109-121. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.08.004>
- Strait, D. L., Kraus, N., Parbery-Clark, A., & Ashley, R. (2010). Musical Experience Shapes Top-Down Auditory Mechanisms: Evidence from Masking and Auditory Attention Performance. *Hearing Research*, 261, 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.12.021>
- Tarasenko, M., Perez, V. B., Pianka, S. T., Vinogradov, S., Braff, D. L., Swerdlow, N. R., & Light, G. A. (2016). Measuring the Capacity for Auditory System Plasticity: An Examination of Performance Gains during Initial Exposure to Auditory-Targeted Cognitive Training in Schizophrenia. *Schizophrenia Research*, 172, 123. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2016.01.019>
- Trainor, L. J. (2005). Are There Critical Periods for Musical Development? *Developmental Psychobiology*, 46, 262-278. <https://doi.org/10.1002/dev.20059>
- Vaquero, L., Hartmann, K., Ripollés, P., Rojo, N., Sierpowska, J., François, C., & Samii, A. (2016). Structural Neuroplasticity in Expert Pianists Depends on the Age of Musical Training Onset. *Neuroimage*, 126, 106-119. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.11.008>
- Werker, J. F., & Tees, R. C. (2010). Speech Perception as a Window for Understanding Plasticity and Commitment in Language Systems of the Brain. *Developmental Psychobiology*, 46, 233-251. <https://doi.org/10.1002/dev.20060>
- Wong, P. C. M., Erika, S., Russo, N. M., Tasha, D., & Nina, K. (2007). Musical Experience Shapes Human Brainstem Encoding of Linguistic Pitch Patterns. *Nature Neuroscience*, 10, 420-422. <https://doi.org/10.1038/nn1872>
- Zatorre, R. J. (2013). Predispositions and Plasticity in Music and Speech Learning: Neural Correlates and Implications. *Science*, 342, 585-589. <https://doi.org/10.1126/science.1238414>