НЕЙРОФИЗИОЛОГИЯ СОЦИАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ: РАЗЛИЧНЫЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОЗГА

Е.Д. Каримова ✉

ФГБУН Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия

В исследовании на 40 здоровых женщинах изучалось влияние различных факторов на подавление мю-ритма, ассоциированного с системой зеркальных нейронов (СЗН), в условиях наблюдения и имитации движений. Основными факторами, оказывающими влияние на подавление мю-ритма, стали наличие детей, уровень эмпатии и ситуативная тревожность. Было выявлено, что материнский и отцовский опыт значимо связан с активацией структур, содержащих зеркальные нейроны. Также подтверждена связь эмпатии с активностью СЗН, что указывает на важную роль зеркальных нейронов в процессах сопереживания. Исследование показало, что ситуативные эмоциональные состояния, такие как тревожность, оказывают влияние на работу СЗН, в то время как пол и возраст демонстратора не оказывают значительного эффекта. Использованная методология, включая анализ независимых компонент (ICA), позволила минимизировать интерференцию альфа-ритма и получить точные данные о работе СЗН в социальных контекстах.

Ключевые слова: система зеркальных нейронов, мю-ритм, эмпатия, тревожность, родительский опыт, имитация движений, подавление ритма.

✉ **Для корреспонденции:** Каримова Екатерина Дмитриевна; e.d.karimova@ihna.ru

Статья получена: 05.11.2024 **Статья принята к печати:** 15.12.2024 **Опубликована онлайн:** 22.12.2024

DOI: 10.24075/vmedpsy.2024-02.04

NEUROPHYSIOLOGY OF SOCIAL INTERACTIONS: VARIOUS ASPECTS OF THE FUNCTIONING OF THE MIRROR NEURON SYSTEM

Karimova ED ✉

Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

This study examined the influence of various factors on the suppression of the mu rhythm, associated with the mirror neuron system (MNS), during movement observation and imitation in 40 healthy women. The primary factors influencing mu rhythm suppression were found to be parental experience, empathy levels, and situational anxiety. It was revealed that maternal and paternal experience is significantly linked to the activation of structures containing mirror neurons. Additionally, the connection between empathy and MNS activity was confirmed, highlighting the critical role of mirror neurons in processes of empathy. The study showed that situational emotional states, such as anxiety, affect MNS activity, while the demonstrator's gender and age do not have a significant effect. The methodology, including Independent Component Analysis (ICA), minimized alpha rhythm interference and provided precise data on MNS functioning in social contexts.

Keywords: mirror neuron system, mu rhythm, empathy, anxiety, parental experience, movement imitation, rhythm suppression.

✉ **Correspondence should be addressed:** Ekaterina D. Karimova; e.d.karimova@ihna.ru

Received: 05.11.2024 **Accepted:** 15.12.2024 **Published online:** 22.12.2024

DOI: 0.24075/vmedpsy.2024-02.04

1. Введение

Во многом социальное поведение человека зависит от работы системы зеркальных нейронов (СЗН), которая активируется при наблюдении и повторении действий и жестов других людей. Первоначально зеркальные нейроны были обнаружены в моторной коре макака в 1996 году итальянскими учеными под руководством Риццоллатти [1]. В 2010 году Мукамель предоставил достоверные доказательства существования зеркальных нейронов у людей в исследованиях на пациентах с эпилепсией, используя инвазивные методы изучения активности отдельных нейронов в моторной коре, премоторной коре и гиппокампе [2]. Основным интерес к этой системе возник из-за ее способности активироваться избирательно в процессе социального взаимодействия. Это стало важным аспектом исследований, связанных с эмпатией и восприятием моторных действий [3].

1.1. Мю-ритм и активность зеркальных нейронов

Кроме того, исследования показали, что активность СЗН модулирует сенсомоторный мю-ритм на ЭЭГ, поэтому уровень подавления или десинхронизации мю-ритма используется как индикатор активности СЗН в экспериментах, связанных с социальным взаимодействием [4, 5]. В обзоре Фокс и его коллег обсуждались многочисленные исследования, показывающие связь между активностью СЗН и мю-ритмом, что позволило рассматривать мю-ритм как маркер активности зеркальных нейронов [5]. Однако есть критики этого подхода, такие как Хобсон и Бишоп, которые выразили сомнения в его достоверности, так как подавление мю-ритма может быть связано с визуальной альфа-реакцией и вниманием во время наблюдения за движениями [6,7]. Тем не менее, возможно, что визуальное внимание и активация СЗН происходят одновременно, и эта проблема может быть решена с помощью методических подходов и математических инструментов.

1.2. Связь СЗН и эмпатии

Свойства зеркальных нейронов практически сразу навели исследователей на мысль о возможной связи этой системы с процессами эмпатии в широком смысле этого понятия. Способность к сопереживанию и сочувствию — то есть возможность чувствовать то же самое, что и ваш собеседник — напрямую связывается с зеркальными нейронами, которые, по сути, проецируют действия и эмоции другого человека. Связь между активностью системы зеркальных нейронов и эмпатией начала подтверждаться еще в 2003 году в исследованиях под руководством Якобони [8]. В этих работах были обнаружены тесные связи между системой зеркальных нейронов и лимбической системой через островковую кору. Дальнейшие исследования роли СЗН в восприятии мимики и жестов показали, что существуют анатомические особенности, ответственные за «проекцию» движений рук и мимических выражений лица [9].

Кроме того, значительное количество исследований показало различия в активности СЗН у здоровых людей и пациентов с шизофренией или расстройствами аутистического спектра [10,11], которые характеризуются нарушениями высших уровней социальной когнитивной функции. В одном исследовании изучалось влияние действий, связанных с вознаграждением, на активность СЗН [12]. Результаты показали тенденцию к снижению подавления мю-ритма у пациентов. Более того, как эмпатия, так и способность к рассуждениям об эмоциональных состояниях были связаны со степенью подавления мю-ритма, но только у здоровых участников.

1.3. Гендерный аспект

В дальнейших исследованиях активности мю-ритма ЭЭГ в сенсомоторной коре было обнаружено, что женщины демонстрируют более высокую активность СЗН при наблюдении за движениями рук по сравнению с мужчинами [13]. Более того, женские участники показали более сильное подавление мю-ритма при наблюдении за болевыми ситуациями [14], а также более значимые корреляции между активностью ЗНС при восприятии боли и показателями личного стресса. Другое исследование [15] поддержало эти выводы, демонстрируя более высокую степень подавления мю-ритма в центральных и первичных соматосенсорных областях у женщин при наблюдении за болевыми стимулами, направленными на человеческую руку. Авторы интерпретировали это как свидетельство более сильной «резонансной» реакции у женщин на боль других.

1.4. Родительский аспект и СЗН

В некоторых исследованиях, посвященных функциям зеркальной системы, упоминается её роль в отношениях «родитель-ребёнок». Например, Шон Хо отмечает, что одним из примеров активности СЗН является диада «родитель-ребёнок», и такие исследования важны для изучения нейрофизиологии родственных отношений и понимания вклада СЗН в родительские функции [16]. Нейровизуализационные исследования [17,18] продемонстрировали активацию мозговых структур, создающих социальную сеть в ответ на видео с участием детей, где задействованы функции ментализации, зеркалирования и внимания, а также обнаружение зеркальных нейронов в этих областях. Эти результаты указывают на синхронность BOLD-сигналов у матерей и отцов в сетях СЗН, связанных с ментализацией и эмпатией, включая островковую кору и дорсомедиальную префронтальную кору [18]. Авторы предположили, что с помощью этого механизма родители могут интуитивно понимать состояние и сигналы ребёнка.

1.5. Тревожность и система зеркальных нейронов

В упомянутом исследовании было показано, что у матерей с навязчивым и тревожным поведением

наблюдалась сниженная активация СЗН при просмотре видеозаписей с детьми, в отличие от синхронных и понимающих матерей [17]. Активность мю-ритма в префронтальной области и дорсальной части гиппокампа, выявленная Такилья [19], может служить биомаркером стресса у крыс разного возраста. Активация зеркальной системы, зафиксированная с помощью фМРТ для различения пациентов с посттравматическим стрессовым расстройством от контрольной группы, коррелировала с тяжестью симптомов и предсказывала результаты обучения [20].

До сих пор остаётся неясным, какие именно факторы – генетические, физиологические, социальные или психологические – оказывают влияние на более высокую активность СЗН у женщин. В данной работе мы постарались ответить на вопрос о том, связаны ли некоторые социальные факторы, включая самооценку психологических характеристик (уровень тревожности, уровень эмпатии), наличие детей или возраст, с активностью мю-ритма ЭЭГ как маркера активности СЗН.

2. Материалы и методы

2.1. Участники исследования

В исследовании приняли участие 40 женщин в возрасте от 22 до 39 лет (26 из них имеют детей, средний возраст – 34 года; 14 не имеют детей, средний возраст – 28 лет). Для исключения влияния сторонних факторов на подавление мю-ритма, мы выбрали узкую социальную группу. Критерии включения: праворукость, возраст 21 – 40 лет, наличие до трёх детей, прошедшие два года с последнего рождения и более года с момента прекращения грудного вскармливания (для женщин с детьми), высшее образование, работа не менее 20 часов в неделю, наличие партнера. Критерии исключения: депрессия, эпилепсия, черепно-мозговые травмы средней и тяжёлой степени, алкогольная или наркотическая зависимость, неврологические заболевания, прием нейролептиков в последние 6 месяцев. Все участницы имели высшее образование, работали и проживали в Москве или Московской области. Предварительный отбор проводился через научные интернет-сообщества и с помощью проекта Selfmama Russia. Исследование одобрено этическим комитетом Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Участницы подписали информированное согласие.

2.2. Процедура исследования

После подписания согласия участницы прошли подготовку к регистрации ЭЭГ. Эксперимент проводился в звукоизолированном боксе перед монитором на расстоянии около 1 метра. Запись 32-канальной ЭЭГ длилась около 30 минут. После регистрации ЭЭГ был проведён тест эмоционального интеллекта Холла (Ильин, 2001), на основе которого оценивалась эмпатия, связанная с активностью зеркальной нейронной системы. Затем

участницы заполнили шкалу тревожности Спилберге-ра (STAI). Также был проведён опрос об их социальном статусе, структуре семьи и фазе менструального цикла. Предварительный анализ не выявил влияния цикла на подавление мю-ритма.

2.3. Экспериментальный дизайн

Для демонстрации стимулов использовалась программа Presentation. Были подготовлены видеозаписи движений руки трёх демонстраторов (женщина, мужчина и 6-летний мальчик): сжатие кулака, движение «кулак-ладонь», перемещение шара в коробку и хлоп-ки. Участницам нужно было синхронно повторять движения за демонстратором. Для отделения мю-ритма от альфа-ритма записывались контрольные образцы в состоянии покоя с открытыми и закрытыми глазами, а также при выполнении моторных действий.

2.4. Запись и анализ ЭЭГ

Запись ЭЭГ проводилась с использованием BrainAmp DC Amplifier (Brain Products GmbH, Германия). Данные обрабатывались с помощью MNE-Python. Компоненты мю-ритма выделялись с помощью метода независимого компонентного анализа (ICA). Для оценки уровня подавления мю-ритма использовалось относительное изменение мощности сигнала в децибелах: $10 \log(P_{\text{task}}/P_{\text{baseline}})$, dB. Статистический анализ проводился с использованием программы Statistica 10 с применением повторных измерений дисперсионного анализа (RM ANOVA) и пост-хок теста Тьюки.

3. Результаты

На первом этапе анализа с использованием RM ANOVA был выявлен значимый эффект типа движения рук на степень подавления мю-ритма ($F = 7.16$, $p = 0.0001$), который уменьшался с первого до четвертого движения при синхронном выполнении. Влияние разных демонстраторов на мю-десинхронизацию не выявлено ($F = 0.38$, $p = 0.68$), поэтому дальнейший анализ проводился без учета этого фактора.

На втором этапе был изучен эффект зрительного внимания на подавление мю-ритма. RM ANOVA показал значимые различия между статической контрольной задачей и четырьмя моторными заданиями ($F = 22.8$, $p < 0.0001$). Пост-хок тест Тьюки показал значимые различия между статическим контролем и каждой моторной задачей ($p < 0.0002$).

На третьем этапе исследовано влияние демографических и психофизиологических факторов на подавление мю-ритма у женщин. Значимое влияние показали наличие детей ($F = 10.59$, $p = 0.0015$), количество детей ($F = 5.64$, $p = 0.0047$), эмпатия ($F = 13.79$, $p = 0.0003$) и уровень ситуативной тревожности ($F = 12.40$, $p = 0.0006$) без взаимодействия с фактором повторных измерений.

Анализ влияния возраста показал, что фактор

возраста не имеет значимого влияния на подавление мю-ритма ($F = 3.6$, $p = 0.06$), несмотря на различие в среднем возрасте групп с детьми (34 года) и без детей (27 лет).

Таким образом, степень подавления мю-ритма выше у женщин с детьми ($M = -4.05$, $SD = 4.38$) по сравнению с женщинами без детей ($M = -2.43$, $SD = 3.20$), особенно у женщин с одним ребенком ($M = -4.29$, $SD = 4.28$). Более выраженная эмпатия ($M = -4.20$, $SD = 4.18$) и низкий уровень ситуативной тревожности ($M = -4.39$, $SD = 4.20$) также ассоциированы с более высокой степенью мю-супрессии. Возраст не оказал значимого влияния на мю-супрессию.

Дополнительный анализ показал, что уровень эмпатии не различается между женщинами с детьми и без ($Z = -2.3$, $p = 0.02$), тогда как уровень личностной ($Z = 3.8$, $p = 0.0001$) и ситуативной тревожности ($Z = 4.7$, $p < 0.0001$) ниже у женщин с детьми.

4. Заключение

В данном исследовании выявлено, что среди изученных факторов наибольшее влияние на уровень подавления мю-ритма оказали наличие детей, уровень эмпатии и ситуативная тревожность. Наиболее интересным результатом стало влияние материнства на активность мю-ритма, что может свидетельствовать об участии системы зеркальных нейронов в родительском

опыте. Было показано, что материнский и отцовский опыт тесно связан с активацией структур, содержащих зеркальные нейроны, а окситоцин, как важный гормон регуляции родительского поведения, усиливает мю-десинхронизацию.

Также подтверждена связь между эмпатией и подавлением мю-ритма, что свидетельствует о правильности методологического подхода и активации СЗН в разработанной парадигме. СЗН, вероятно, играет ключевую роль в процессах эмпатии, поскольку это система, которая помогает проецировать действия и эмоции других людей на себя.

Наблюдаемая связь ситуативной тревожности с уровнем подавления мю-ритма подчеркивает влияние текущего психоэмоционального состояния на СЗН. При этом постоянная тревожность не оказала значимого эффекта, что подтверждает данные других исследований о влиянии ситуативных факторов на работу зеркальных нейронов.

Несмотря на сложности, связанные с разделением альфа- и мю-ритмов, использованная методология, включая ICA, позволила минимизировать проблемы, связанные с визуальным вниманием и интерференцией альфа-ритма. Использование парадигмы одновременного наблюдения и повторения движений привело к максимальной активации СЗН, что подтверждает значимость социального контекста и обучения через имитацию для активации зеркальных нейронов.

Литература

- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., and Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119(2), 593–609. <https://doi.org/10.1093/brain/119.2.593>
- Mukamel, R., Ekstrom, A. D., Kaplan, J., Iacoboni, M., and Fried, I. (2010). Single-Neuron Responses in Humans during Execution and Observation of Actions. *Current Biology*, 20(8), 750–756. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.02.045>
- Rizzolatti, G., and Sinigaglia, C. (2016). The mirror mechanism: a basic principle of brain function. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(12), 757–765. <https://doi.org/10.1038/nrn.2016.135>
- Bimbi, M., Festante, F., Coudé, G., Vanderwert, R.E., Fox, N.A., and Ferrari, P. F. (2018). Simultaneous scalp recorded EEG and local field potentials from monkey ventral premotor cortex during action observation and execution reveals the contribution of mirror and motor neurons to the mu-rhythm. *NeuroImage*. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.03.037>
- Fox, N.A., Yoo, K. H., Bowman, L.C., Cannon, E.N., Ferrari, P.F., Bakermans-Kranenburg, M.J., Vanderwert, R.E., and Van IJzendoorn, M.H. (2016). Assessing human mirror activity With EEG mu rhythm: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*. <https://doi.org/10.1037/bul0000031>
- Hobson, H.M., and Bishop, D.V.M. (2016). Mu suppression – A good measure of the human mirror neuron system? *Cortex*. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.03.019>
- Hobson, H.M., and Bishop, D.V.M. (2017). The interpretation of mu suppression as an index of mirror neuron activity: past, present and future. *Royal Society Open Science*, 4(3), 160662. <https://doi.org/10.1098/rsos.160662>
- Carr, L., Iacoboni, M., Dubeau, M.-C., Mazziotta, J. C., and Lenzi, G. L. (2003). Neural mechanisms of empathy in humans: A relay from neural systems for imitation to limbic areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(9), 5497–5502. <https://doi.org/10.1073/pnas.0935845100>
- Ferrari, P.F., Gerbella, M., Coudé, G., and Rozzi, S. (2017a). Two different mirror neuron networks: The sensorimotor (hand) and limbic (face) pathways. *Neuroscience*, 358, 300–315. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.06.052>
- Khalil, R., Tindle, R., Boraud, T., Moustafa, A. A., and Karim, A. A. (2018). Social decision making in autism: On the impact of mirror neurons, motor control, and imitative behaviors. *CNS Neuroscience & Therapeutics*, 24(8), 669–676. <https://doi.org/10.1111/cns.13001>
- Salimova, K. R. (2022). Neurophysiological Correlates of Impaired Development in Autism Spectrum Disorder (ASD). *Biology Bulletin Reviews*, 12(2), 140–148. <https://doi.org/10.1134/S2079086422020074>
- Brown, E.C., Gonzalez-Liencre, C., Tas, C., and Brüne, M. (2016). Reward modulates the mirror neuron system in schizophrenia: A study into the mu rhythm suppression, empathy, and mental state attribution. *Social Neuroscience*, 11(2), 175–186. <https://doi.org/10.1080/17470919.2015.1053982>
- Cheng, Y., Lee, P.-L., Yang, C.-Y., Lin, C.-P., Hung, D., and Decety, J. (2008). Gender Differences in the Mu Rhythm of the Human Mirror-Neuron System. *PLoS ONE*, 3(5), e2113. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002113>
- Yang, C.-Y., Decety, J., Lee, S., Chen, C., and Cheng, Y. (2009). Gender differences in the mu rhythm during empathy for pain: An electroencephalographic study. *Brain Research*, 1251, 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.11.062>
- Christov-Moore, L., and Iacoboni, M. (2019). Sex differences in somatomotor representations of others' pain: a permutation-based analysis. *Brain Structure and Function*, 224(2), 937–947. <https://doi.org/10.1007/s00429-018-1814-y>

Литература

16. Ho, S.S., MacDonald, A., and Swain, J.E. (2014). Associative and sensorimotor learning for parenting involves mirror neurons under the influence of oxytocin. *Behavioral and Brain Sciences*, 37(2), 203–204. <https://doi.org/10.1017/S0140525X1300232X>
17. Atzil, S., Hendler, T., and Feldman, R. (2011). Specifying the Neurobiological Basis of Human Attachment: Brain, Hormones, and Behavior in Synchronous and Intrusive Mothers. *Neuropsychopharmacology*, 36(13), 2603–2615. <https://doi.org/10.1038/npp.2011.172>
18. Atzil, S., Hendler, T., Zagoory-Sharon, O., Winetraub, Y., and Feldman, R. (2012). Synchrony and Specificity in the Maternal and the Paternal Brain: Relations to Oxytocin and Vasopressin. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 51(8), 798–811. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2012.06.008>
19. Takillah, S., Naudé, J., Didiene, S., Sebban, C., Decros, B., Schenker, E., Spedding, M., Mourrot, A., Mariani, J., and Faure, P. (2017). Acute Stress Affects the Expression of Hippocampal Mu Oscillations in an Age-Dependent Manner. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 9, 295. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00295>
20. Tan, K.M., Burklund, L.J., Craske, M. G., and Lieberman, M.D. (2019). Posttraumatic stress disorder and the social brain: Affect-related disruption of the default and mirror networks. *Depression and Anxiety*, 36(11), 1058–1071. <https://doi.org/10.1002/da.22953>

References

1. Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., and Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119(2), 593–609. <https://doi.org/10.1093/brain/119.2.593>
2. Mukamel, R., Ekstrom, A.D., Kaplan, J., Iacoboni, M., and Fried, I. (2010). Single-Neuron Responses in Humans during Execution and Observation of Actions. *Current Biology*, 20(8), 750–756. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.02.045>
3. Rizzolatti, G., and Sinigaglia, C. (2016). The mirror mechanism: a basic principle of brain function. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(12), 757–765. <https://doi.org/10.1038/nrn.2016.135>
4. Bimbi, M., Festante, F., Coudé, G., Vanderwert, R.E., Fox, N. A., and Ferrari, P. F. (2018). Simultaneous scalp recorded EEG and local field potentials from monkey ventral premotor cortex during action observation and execution reveals the contribution of mirror and motor neurons to the mu-rhythm. *NeuroImage*. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.03.037>
5. Fox, N.A., Yoo, K.H., Bowman, L.C., Cannon, E.N., Ferrari, P.F., Bakermans-Kranenburg, M.J., Vanderwert, R.E., and Van I Jzendorn, M. H. (2016). Assessing human mirror activity With EEG mu rhythm: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*. <https://doi.org/10.1037/bul0000031>
6. Hobson, H.M., and Bishop, D.V.M. (2016). Mu suppression – A good measure of the human mirror neuron system? *Cortex*. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.03.019>
7. Hobson, H.M., and Bishop, D.V.M. (2017). The interpretation of mu suppression as an index of mirror neuron activity: past, present and future. *Royal Society Open Science*, 4(3), 160662. <https://doi.org/10.1098/rsos.160662>
8. Carr, L., Iacoboni, M., Dubeau, M.-C., Mazziotta, J.C., and Lenzi, G.L. (2003). Neural mechanisms of empathy in humans: A relay from neural systems for imitation to limbic areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(9), 5497–5502. <https://doi.org/10.1073/pnas.0935845100>
9. Ferrari, P. F., Gerbella, M., Coudé, G., and Rozzi, S. (2017a). Two different mirror neuron networks: The sensorimotor (hand) and limbic (face) pathways. *Neuroscience*, 358, 300–315. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.06.052>
10. Khalil, R., Tindle, R., Boraud, T., Moustafa, A. A., and Karim, A. A. (2018). Social decision making in autism: On the impact of mirror neurons, motor control, and imitative behaviors. *CNS Neuroscience & Therapeutics*, 24(8), 669–676. <https://doi.org/10.1111/cns.13001>
11. Salimova, K.R. (2022). Neurophysiological Correlates of Impaired Development in Autism Spectrum Disorder (ASD). *Biology Bulletin Reviews*, 12(2), 140–148. <https://doi.org/10.1134/S2079086422020074>
12. Brown, E.C., Gonzalez-Liencre, C., Tas, C., and Brüne, M. (2016). Reward modulates the mirror neuron system in schizophrenia: A study into the mu rhythm suppression, empathy, and mental state attribution. *Social Neuroscience*, 11(2), 175–186. <https://doi.org/10.1080/17470919.2015.1053982>
13. Cheng, Y., Lee, P.-L., Yang, C.-Y., Lin, C.-P., Hung, D., and Decety, J. (2008). Gender Differences in the Mu Rhythm of the Human Mirror-Neuron System. *PLoS ONE*, 3(5), e2113. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002113>
14. Yang, C.-Y., Decety, J., Lee, S., Chen, C., and Cheng, Y. (2009). Gender differences in the mu rhythm during empathy for pain: An electroencephalographic study. *Brain Research*, 1251, 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.11.062>
15. Christov-Moore, L., and Iacoboni, M. (2019). Sex differences in somatomotor representations of others' pain: a permutation-based analysis. *Brain Structure and Function*, 224(2), 937–947. <https://doi.org/10.1007/s00429-018-1814-y>
16. Ho, S.S., MacDonald, A., and Swain, J.E. (2014). Associative and sensorimotor learning for parenting involves mirror neurons under the influence of oxytocin. *Behavioral and Brain Sciences*, 37(2), 203–204. <https://doi.org/10.1017/S0140525X1300232X>
17. Atzil, S., Hendler, T., and Feldman, R. (2011). Specifying the Neurobiological Basis of Human Attachment: Brain, Hormones, and Behavior in Synchronous and Intrusive Mothers. *Neuropsychopharmacology*, 36(13), 2603–2615. <https://doi.org/10.1038/npp.2011.172>
18. Atzil, S., Hendler, T., Zagoory-Sharon, O., Winetraub, Y., and Feldman, R. (2012). Synchrony and Specificity in the Maternal and the Paternal Brain: Relations to Oxytocin and Vasopressin. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 51(8), 798–811. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2012.06.008>
19. Takillah, S., Naudé, J., Didiene, S., Sebban, C., Decros, B., Schenker, E., Spedding, M., Mourrot, A., Mariani, J., and Faure, P. (2017). Acute Stress Affects the Expression of Hippocampal Mu Oscillations in an Age-Dependent Manner. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 9, 295. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00295>
20. Tan, K.M., Burklund, L.J., Craske, M.G., and Lieberman, M.D. (2019). Posttraumatic stress disorder and the social brain: Affect-related disruption of the default and mirror networks. *Depression and Anxiety*, 36(11), 1058–1071. <https://doi.org/10.1002/da.22953>