

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623435>

# Синхронизация в мультиплексной сети с симплектической топологией и различными временными масштабами

Т. Лаптева<sup>1</sup>\*, С. Джалан<sup>2</sup>, М. Иванченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Indian Institute of Technology, Индор, Симроль, Индия

## АННОТАЦИЯ

Экспериментальные результаты, указывающие на роль глиальных клеток, в особенности астроцитов, в формировании нейрональной активности как в культуральных средах, так и в мозге подкрепляют интерес к изучению динамических свойств многокомпонентных сетей [1]. Для исследования таких систем используются математические модели различной степени физиологической детализации: от моделей Ходжкина–Хаксли и Уллаха для нейронов и астроцитов соответственно до сильно упрощённых систем типа накопление–сброс и фазовых осцилляторов. Последние обычно рассматриваются в случае, когда задача состоит в определении наиболее общих динамических свойств ансамблей, в первую очередь эффектов, возникающих в зависимости от топологии сети, и в меньшей степени зависящих от динамических свойств отдельных её элементов. В этой связи рассматривается мультиплексная (двухслойная) сеть [2]: топология синаптических связей между нейронами относится к классу дальних случайных взаимодействий, в то время как взаимодействие между глиальными клетками опосредовано диффундирующими молекулами-медиаторами и поэтому носит локальный характер. Помимо этого, временные масштабы колебаний нейронов и астроцитов различаются как минимум на порядок.

Синхронизация колебательных ансамблей вызывает интерес как один из основополагающих динамических процессов, определяющих обработку информации, принятие решений и координацию движений биологическими нейронами [3]. Роль топологии связей в ансамбле значительна: в глобально связанных системах, также как и в случайных сетях Эрдёша–Реньи наблюдается фазовый переход второго рода к так называемой глобальной фазовой когерентности, а в случае локальной связи (например, двумерной решёточной топологии) возможны только захват частоты или фазы. В симплектических сетях возможен фазовый переход первого рода к синхронизации, известный как «взрывная» синхронизация [4].

Недавно было обнаружено, что мультиплексирование «нейронального» (со случайной топологией) и «глиального» (регулярной решётки) осцилляторных слоёв даёт интересные свойства синхронизации [5]. В частности, в регулярной «глиальной» решётке может быть индуцирован фазовый переход второго рода к синхронизации. С другой стороны, переход к синхронизации в обоих слоях происходит через предварительное разрушение синхронизации в каждом отдельном слое в процессе увеличения силы глиального взаимодействия.

Мы представляем результаты дальнейшего исследования мультиплексных нейрон–глиальных сетей, обобщая топологию нейрональной сети на случай симплектических «триадных» взаимодействий. Показано, что фазовый переход первого рода к синхронизации в регулярной «глиальной» решётке может быть индуцирован симплектической связью внутри «нейронального». Кроме того, такой фазовый переход может происходить при усилении глиальных связей даже при том, что связь между нейронами была бы слишком слаба, чтобы такой переход состоялся в изолированном нейрональном слое. При этом переход к десинхронизации в нейрональном слое, вызываемый умеренным усилением глиальной связи, никогда не является резким.

**Ключевые слова:** синхронизация; мультиплексные сети; симплектические сети.

## Как цитировать:

Лаптева Т., Джалан С., Иванченко М. Синхронизация в мультиплексной сети с симплектической топологией и различными временными масштабами // Гены и клетки. 2023. Т. 18, № 4. С. 854–857. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623435>

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Рукопись получена: 15.05.2023

Рукопись одобрена: 26.11.2023

Опубликована online: 20.01.2024

**Источник финансирования.** Результаты получены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00348).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Halassa M.M., Haydon P.G., Astrocytic networks modulate neuronal activity and behavior // *Annu Rev Physiol.* 2010. Vol. 72. P. 335–355. doi: 10.1146/annurev-physiol-021909-135843
2. Boccaletti S., Bianconi G., Criado R., et al. The structure and dynamics of multilayer networks // *Phys Rep.* 2014. Vol. 544, N 1. P. 1–122. doi: 10.1016/j.physrep.2014.07.001
3. Arenas A., Diaz-Guilera A., Kurths J., et al. Synchronization in complex networks // *Phys Rep.* 2008. Vol. 469, N 3. P. 93–153. doi: 10.1016/j.physrep.2008.09.002
4. Skardal P.S., Arenas A. Higher order interactions in complex networks of phase oscillators promote abrupt synchronization switching // *Commun Phys.* 2020. Vol. 3. P. 218. doi: 10.1038/s42005-020-00485-0
5. Makovkin S., Kumar A., Zaikin A., et al. Multiplexing topologies and time scales: the gains and losses of synchrony // *Phys Rev E.* 2017. Vol. 96, N 5-1. P. 052214. doi: 10.1103/PhysRevE.96.052214

## КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

\* Т. Лаптева; адрес: Российская Федерация, 603022, Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 23; e-mail: tetyana.laptyeva@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623435>

# Synchronization in the two time-scale multiplex network with symplectic interactions

T. Lapyeva<sup>1\*</sup>, S. Jalan<sup>2</sup>, M. Ivanchenko<sup>1</sup><sup>1</sup> National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation;<sup>2</sup> Indian Institute of Technology, Indor, Simrol, India

## ABSTRACT

Mounting experimental evidence suggests a significant role for glial cells, particularly astrocytes, in shaping neuronal activity in both cell cultures and the brain, driving interest in exploring multi-component network dynamics [1]. These systems are modeled at varying levels of physiological detail, ranging from the Hodgkin-Huxley and Ullah models for neurons and astrocytes, respectively, to simple integrate-and-fire models or phase oscillators. Multiplex networks are commonly used to model generic dynamical phenomena, with an emphasis on network connectivity effects rather than the complexity of an individual cell's behavior. This model is particularly advantageous due to its use of a two-layer network structure [2]. This structure accurately describes neural connectivity through the long-range random coupling, while glial cells interact locally through the diffusion of mediatory molecules. Furthermore, the oscillatory timescales between neural and glial cells differ by at least one order of magnitude.

In this context, the analysis of synchronization is a focal point as it is a crucial process that underpins information processing, decision making, and movement control in living neural systems [3]. Network topology is known to be essential, where all-to-all coupling and random Erdos–Renyi connectivity support the second-order phase transition to global phase coherence. In contrast, regular local coupling such as a 2D lattice only permits frequency and phase locking. Additionally, symplectic networks are capable of demonstrating a first-order phase transition, which is commonly referred to as “explosive” synchronization [4].

Recently, studies have shown that combining model neural (random) and glial (regular lattice) oscillatory layers can lead to a variety of outcomes [5]. Specifically, this combination was found to induce a second-order phase transition in the regular glial layer. In addition, synchronization in both layers may be preceded by desynchronization as the coupling between the layers becomes stronger.

Here we investigate synchronization in the multiplex neural–glial network, where the neural layer is symplectic and contains triadic interactions. We demonstrate that symplectic coupling in the neural layer can induce the first order transition in the regular (glial) layer. Additionally, we show that such a transition can be induced by strengthening the glial and interlayer coupling, even if the symplectic neural layer alone is below the synchronization threshold. Desynchronization in the neuronal layer, resulting from the moderated coupling to the glial layer, never occurs abruptly.

**Keywords:** synchronization; multiplex networks; symplectic networks.

## To cite this article:

Lapyeva T, Jalan S, Ivanchenko M. Synchronization in the two time-scale multiplex network with symplectic interactions. *Genes & cells*. 2023;18(4):854–857. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623435>

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

**Funding sources.** This study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-12-00348.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

## REFERENCES

1. Halassa MM, Haydon PG. Astrocytic networks modulate neuronal activity and behavior. *Annu Rev Physiol*. 2010;72:335–355. doi: 10.1146/annurev-physiol-021909-135843

Received: 15.05.2023

Accepted: 26.11.2023

Published online: 20.01.2024

2. Boccaletti S, Bianconi G, Criado R, et al. The structure and dynamics of multilayer networks. *Phys Rep.* 2014;544(1):1–122. doi: 10.1016/j.physrep.2014.07.001
3. Arenas A, Díaz-Guilera A, Kurths J, et al. Synchronization in complex networks. *Phys Rep.* 2008;469(3):93–153. doi: 10.1016/j.physrep.2008.09.002
4. Skardal PS, Arenas A. Higher order interactions in complex networks of phase oscillators promote abrupt synchronization switching. *Commun Phys.* 2020;3:218. doi: 10.1038/s42005-020-00485-0
5. Makovkin S, Kumar A, Zaikin A, et al. Multiplexing topologies and time scales: the gains and losses of synchrony. *Phys Rev E.* 2017;96(5-1):052214. doi: 10.1103/PhysRevE.96.052214

## AUTHORS' CONTACT INFO

\* T. Laptyeva; address: 23 Gagarin avenue, 603022 Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: tetyana.laptyeva@gmail.com