



## МАТЕМАТИКА СОЗНАНИЯ\*

Михаил Рабинович<sup>1</sup>, Пабло Варона<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BioCircuits Institute, US, UCSD, 9500 Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0328

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Madrid, C Francisco Tomás y Valiente, 11, 28049 Madrid, Spain  
E-mail:mrabinovich@gmail.com; pablo.varona@uam.es

В данной слайдовой лекции мы предлагаем новую концепцию для построения математической теории когнитивных функций человека, включая сознание. Такие функции как творчество, принятие решений и предсказания, на основе анализа прошлого, описываются в рамках канонических динамических моделей в форме глобальных иерархических сетей. Блоки таких сетей кооперируются и конкурируют друг с другом за счет ингибирования. Активность сетей демонстрирует переходную цепочечную динамику, для описания которой мы используем гетероклинические структуры, представляющие в ментальном пространстве когнитивные компоненты на разных уровнях иерархии взаимодействия. Впервые мы строим систему кинетических экологических уравнений, описывающих взаимодействие эмоций и когнитивных функций на всех уровнях иерархии. Особенно это необходимо для описания разных этапов творчества. Мы исследуем кооперацию мозга человека и искусственного интеллекта на примере музыкальных импровизаций и создания «кооперативной» музыки. Например, когда робот комплектует информационные группы и на их основе рабочую память, а человек использует эмоции и интуицию для отбора. Уровень творчества оценивается по величине энтропии Колмогорова–Синяя. Анализ совместного музыкального творчества человека и искусственного интеллекта может быть полезен для разных приложений, в частности, для диагностики некоторой группы психиатрических заболеваний.

*Ключевые слова:* Сознание как последовательный динамический процесс, ингибиторные сети мозга, иерархические группы информационных паттернов, многокомпонентные функции и группировка, последовательная динамика рабочей памяти, совместная ментальная активность робота и человека.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-3-5-51

*Образец цитирования:* Рабинович М., Варона П. Математика сознания // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 3. С. 5–51.

\*Авторская презентация лекции «Modeling of Consciousness Dynamics: Decision Making & Creativity», озвученной на Muri Winter School 2017 «Dynamics of Multifunction Brain Networks», January 11–13, 2017, UC San Diego, US.

## MATHEMATICS OF MIND

*Mikhail Rabinovich<sup>1</sup>, Pablo Varona<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>BioCircuits Institute, US, UCSD, 9500 Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0328

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Madrid, C Francisco Tomás y Valiente, 11, 28049 Madrid, Spain  
E-mail:mrabinovich@gmail.com; pablo.varona@uam.es

In this slide-lecture we formulate a novel paradigm for the mathematical description of mental functions such as consciousness, creativity, decision making and prediction of the future based on the past. Such cognitive functions are described in the framework of canonical nonlinear dynamical models that form joint global hierarchical networks. Sub-networks cooperate and compete with each other by inhibition. The suggested approach uses heteroclinic dynamics to represent transitivity and sequential interaction of different cognitive modalities at all levels of network hierarchy. For the first time we build a model of global network dynamics based on a set of kinetic ecological equations describing the interaction with emotion at each level of the hierarchy. This makes the model applicable for the description and understanding of perception, creativity and other complex cognitive processes. We discuss the creativity phenomenon, for example, in a joint «human-robot mind» considering the approximation in which the artificial partner is responsible for the binding and retrieving of multimodal perception information. The formation of chunks and the creation of working memory is a joint effort – human-robot mind. The human mind is responsible for the evaluation of the information in working memory. Creativity is estimated by Kolmogorov–Sinai entropy. As an example, we discuss joint human-robot musical improvisation, which can be generalized for many applications, in particular, in the context of artificial intelligence applications and to address several psychiatric disorders.

*Keywords:* Consciousness as a sequential dynamical process, inhibitory brain networks, hierarchical chunking of information patterns, multimodality and binding, working memory sequential dynamics, human-robot «joint mind».

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-3-5-51

*Paper reference:* Rabinovich M., Varona P. Mathematics of mind. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2017. Vol. 25, Iss. 3. P. 5–51.

Самое увлекательное – это размышлять  
о том, как мы мыслим.

*Фольклор*

Сейчас кажется очевидным, что человеческое поведение представляет собой последовательность элементарных актов – операций, приемов или процедур, сменяющих друг друга во времени. Вспомним танцы, игру на музыкальных инструментах, приготовление кофе или выступление на конференции. Любой из этих процессов, если отвлечься от механизмов генерации программы элементарных действий, легко может быть смоделирован математически с помощью цепочечных моделей. Последовательные элементы, конечно, могут быть различными. Если же мы задумаемся о том каким образом создается в мозгу программа подобного поведения, то есть как организуется смена одного метастабильного состояния цепочки другим и как формируются сами эти состояния, то задача покажется очень сложной и даже невыполнимой. Это впечатление лишь усилится, если мы попытаемся объяснить воображаемые последствия наших действий в настоящем.

Именно поэтому выглядит естественной расхожая точка зрения – интеллект и само сознание это настолько интригующие и даже мистические явления, что они недоступны для формализации и математического описания. Цель данной обзорной лекции в картинках представить альтернативную точку зрения и, если не убедить читателя, то заинтересовать его настолько, что он сам начнет размышлять, как же

мы мыслим, а данная лекция представит ему для этого экспериментальные материалы. Мы сосредоточим внимание на недавних экспериментах, моделях и эволюционных подходах, чтобы проиллюстрировать возможность описания с помощью методов нелинейной динамики таких когнитивных явлений, как творчество, принятие решений, управление вниманием и рабочей памятью.

Сознание, как известно, теряется, когда из строя выходят или попадают под анестезию основные, или центровые структуры, наиболее плотно связанные анатомически друг с другом и, возможно, не напрямую со многими другими структурами. Сознание также пропадает, если нарушается нормальное динамическое взаимодействие между комплексами мозга. Например, когда они в результате чрезмерного возбуждения переходят в режим почти полной взаимной синхронизации, то есть в эпилептический припадок.

В последние пять-семь лет под влиянием впечатляющих экспериментальных данных, в первую очередь, исследования пространственно-временной активности мозга в процессе выполнения когнитивных функций (анализ функциональных магнитно-резонансных паттернов) практически установлено, что функциональная активность мозга это переходный процесс, к которому применимы такие динамические характеристики, как структурная устойчивость, бифуркации, энтропия Колмогорова–Синяя, размерность и т.д.

Считается, что сознание есть результат взаимно скоординированной (иногда еще говорят интегральной) активности большинства когнитивных структур мозга. Разные когнитивные функции выполняются разными иерархическими сетями (networks), каждая из которых объединяет большое число субструктур мозга. Подобную сеть можно рассматривать как нерегулярную дискретную решетку, активность которой представляется набором мод или возбуждений. Переходная динамика, отвечающая когнитивному процессу, есть не что иное, как последовательная смена мод в результате из взаимного подавления по принципу «конкуренция без победителя».

В английском языке помимо слова brain (мозг), есть еще слово mind, которое переводится по разному – разум, интеллект и даже сознание. Мы используем это слово в смысле «пространство когнитивных функций мозга». Для построения математической теории сознания это пространство очень естественно, нужно только удачно ввести динамические переменные.

Психологи на основании огромного количества эмпирических данных разделяют следующие стадии творчества. 1. Предварительная формулировка проблемы и подсознательное набрасывание идей. 2. Инкубационная стадия, когда отбираются наиболее интересные идеи, осознаются детали. 3. Инновационная стадия, где центральным является момент озарения, то есть бифуркация «Эврика». 4. Проверка и оценка сгенерированного решения (мысли, способа и т.д.). Здесь согласованно работают такие когнитивные сетворки, как автобиографическая память (эпизодическая и семантическая), внимание, эмоциональная поддержка, рабочая память и принятие решений. Все вместе эти сетворки образуют иерархическую сеть, динамика которой на разных стадиях решения задачи различна. От случайного блуждания (стадия 1) система переходит в режим регулярной инспекции рабочей памяти – гетероклинические циклы (стадия 2). Затем при взаимодействии рабочей памяти с квазипериодической динамикой внимания в момент «Эврика» рождается хаос или новое метастабильное состояние (стадия 3). Далее принимается решение – то ли мы получили, что нам нужно (стадия 4).

Даже такое шаржированное описание дает представление о далеко идущих возможностях применения нелинейной динамики к описанию процесса творчества и сознания в целом.

MURI Winter School 2017

# ***Modeling of consciousness dynamics: Decision making & Creativity***

**Mikhail Rabinovich** BCI at UCSD

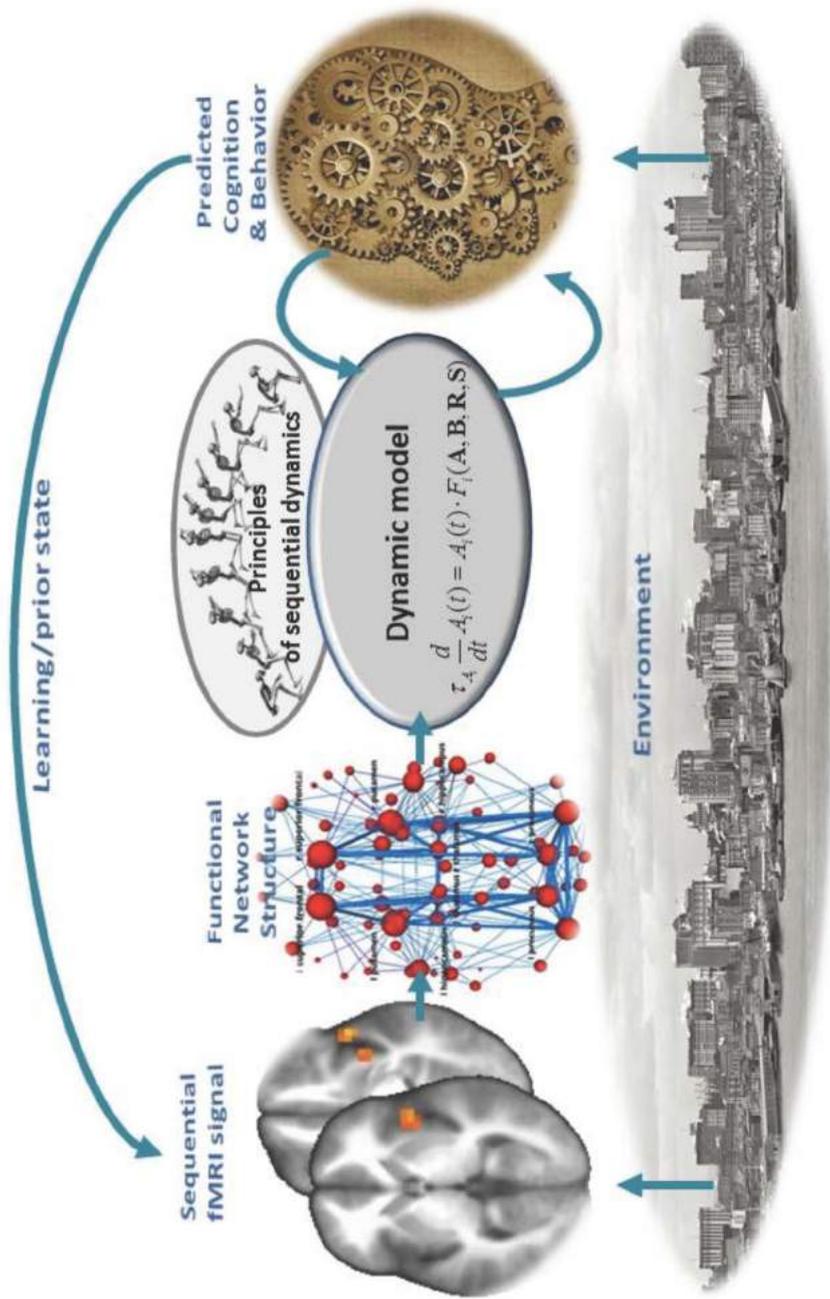
with **Pablo Varona** Madrid, **Alan Simmons** WG and Cognitive  
Dpt UCSD, and **Shlomo Dubnov** Music Dpt UCSD

January 12

# PLAN

- What we are going to model: From brain to mind – global networks dynamic. Consciousness
- Principles of the modeling supported by behavioral and imaging experiments
- Sequential dynamics of WLC networks
- We focus on two conscious processes – creativity & decision making
- Hierarchy in brain and mind
- Attention & memory are dynamical processes

# Dynamical Bridge between Brain and Mind



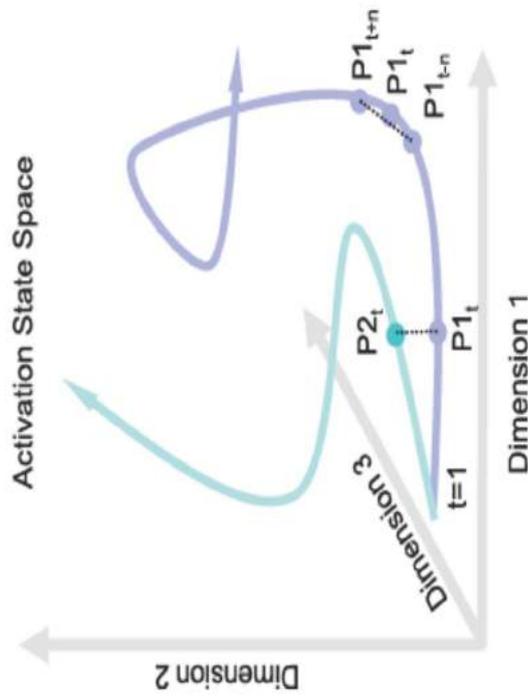
Rabinovich et al., TICS 2015

## **CONSCIOUSNESS**

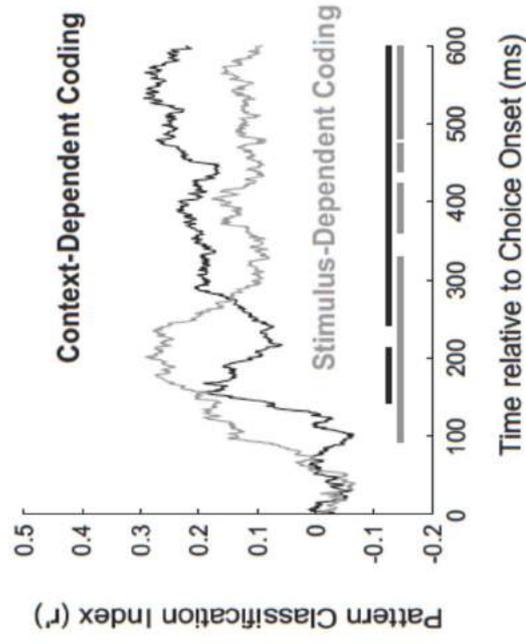
***Is a continuous process of inference  
of the world and any aspects of our life –  
mechanism of updating our memory and  
beliefs***

# SERIAL TRANSIENT CODING IN MONKEY PREFRONTAL CORTEX

(*multielectrode recordings*)



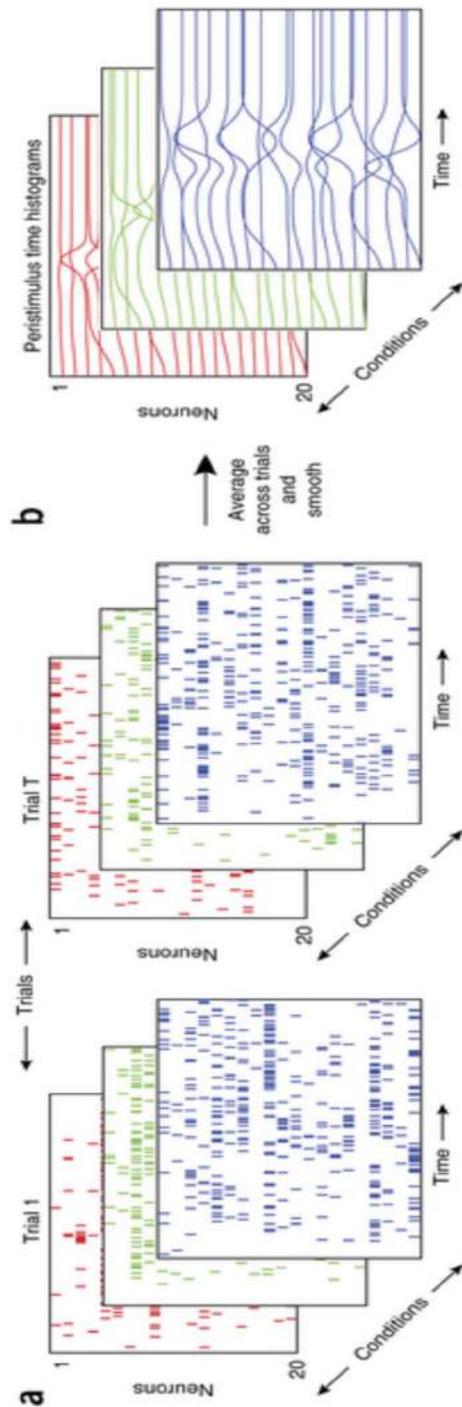
Two different trajectories (corresponding to different strategies) in a 3D “phase space”. Time  $t$  reflects the multidimensional distance in the population response



(Stokes et al., *Neuron*, 2013)

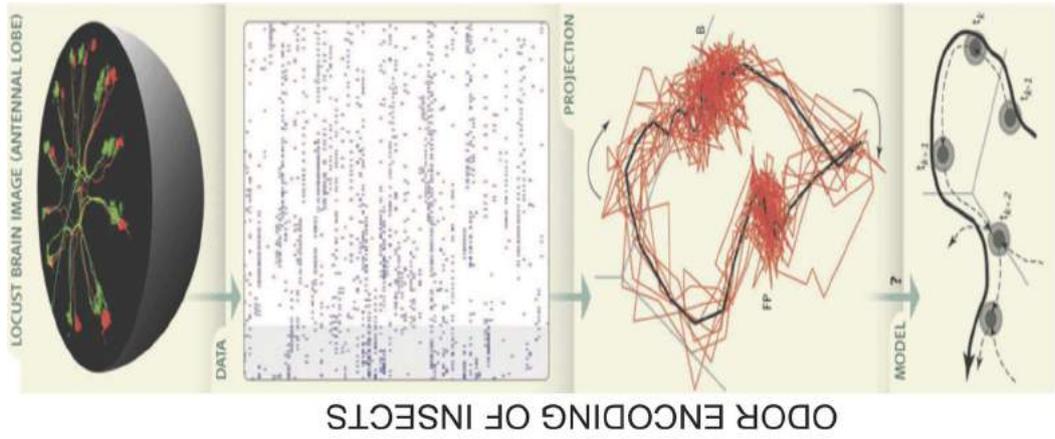
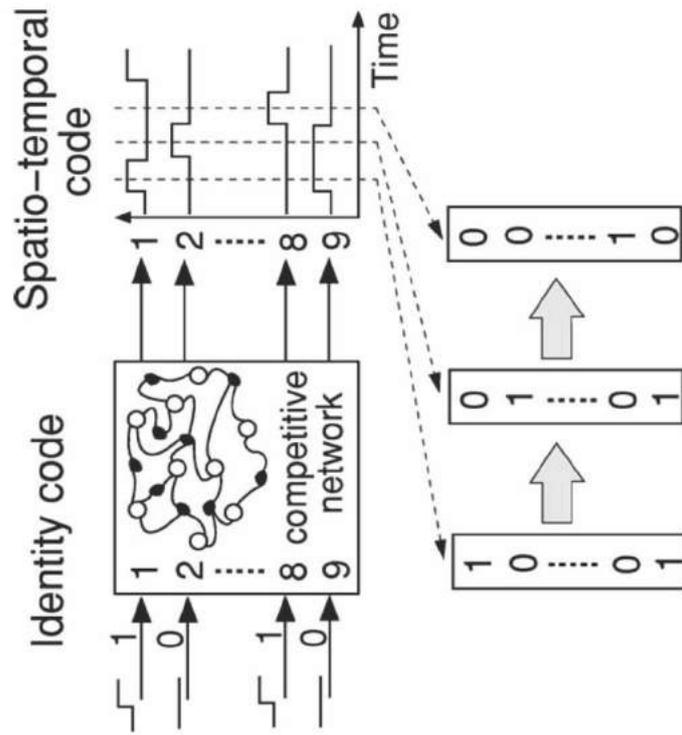
*During decision making, the response to a choice stimulus is characterized by an initial stimulus-specific population response but evolves to different final decision related states depending on the current rule*

# Population analyses and dimensionality reduction



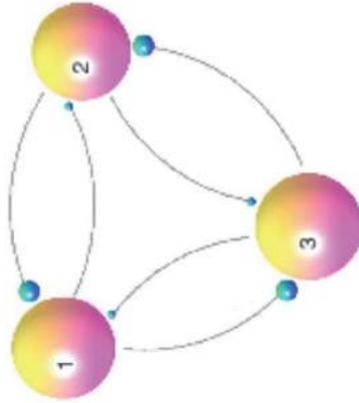
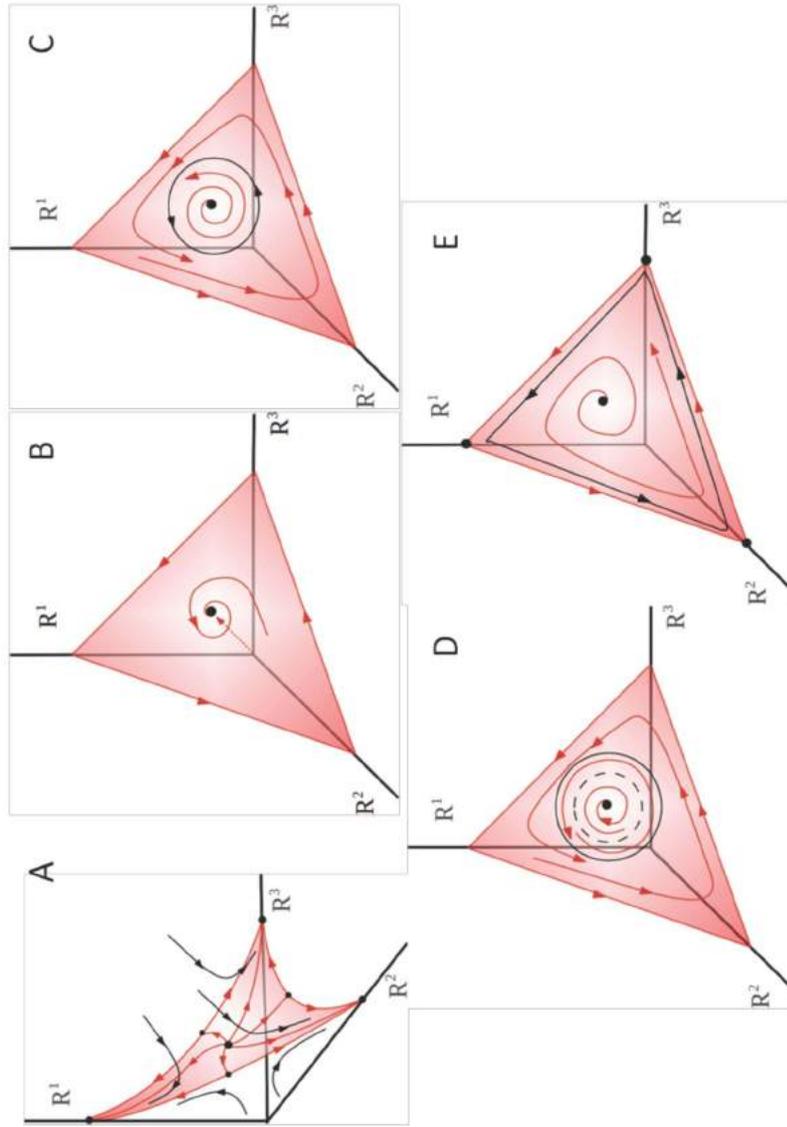
Rabinovich, Huerta & Laurent, *Science*, 2008:  
Cunningham & Byron, *Nature Neuroscience*, 2014

# ODOR ENCODING BY WLC NETWORK



ODOR ENCODING OF INSECTS

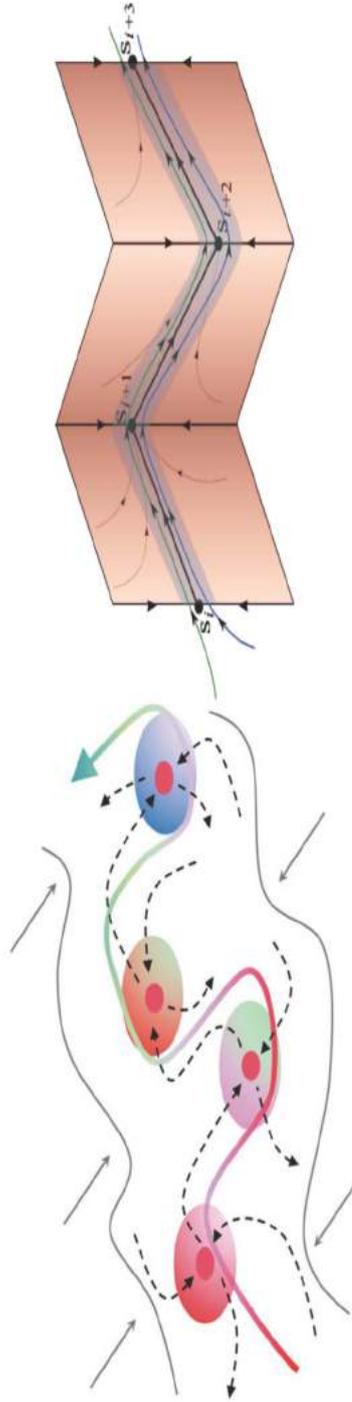
# Winnerless Competition is the dynamical origin of a stable heteroclinic chain – sequence of metastable states



# COGNITIVE DYNAMICS ARE COMPETITIVE AND TRANSIENT — Stable Heteroclinic Channel



Simple Heteroclinic Chain — Landscape Metaphor

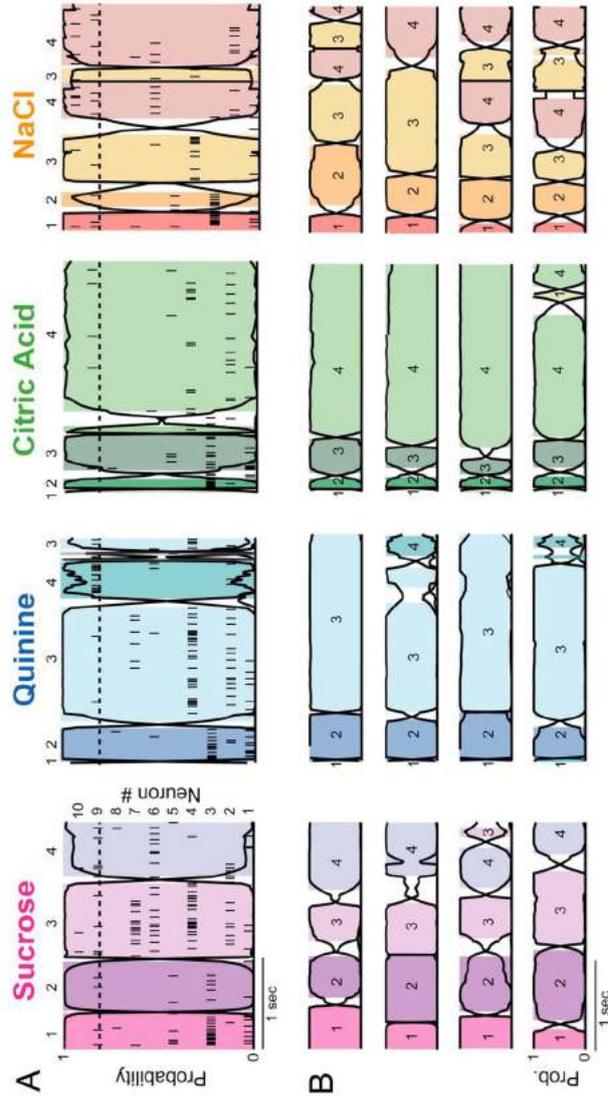


A set of dissipative saddles that are sequentially connected by unstable separatrices. The stability of a channel means that trajectories in the channel do not leave it until the end of the channel is reached.

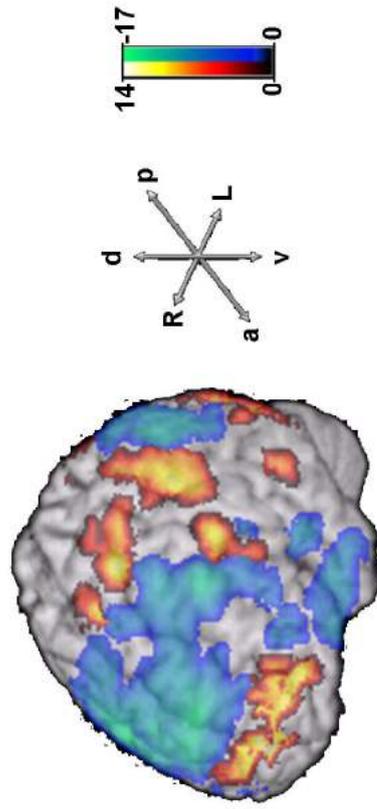
Afraimovich et al., *Chaos*, 2004; Rabinovich et al., *SCIENCE* 2008

# TASTES ENCODING BY TRANSIENT ENVELOPE DYNAMICS

- A. Stimulus-specific sequences in GC for 4 different tastes ;
- B. The sequences of metastable states are reproducible in spite of the irregularity in their switching times (*Jones et al PNAS 2007*).



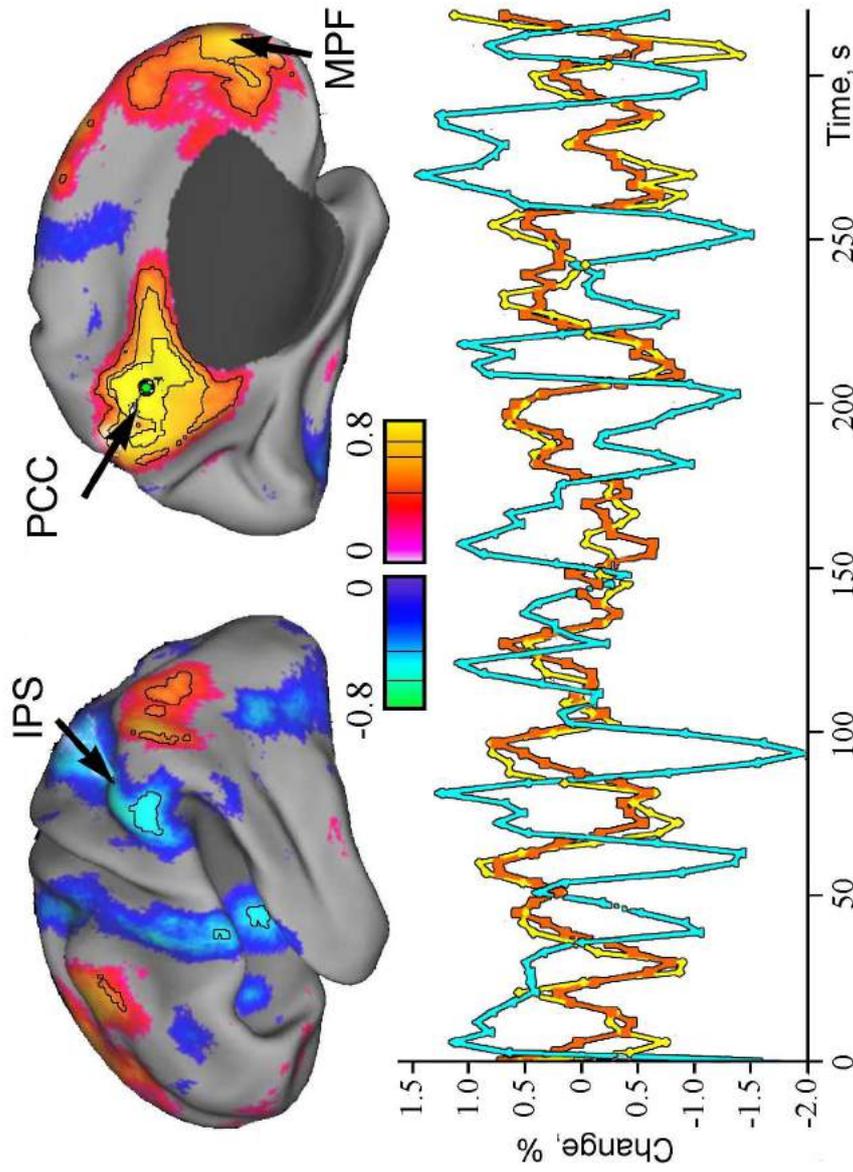
# Jazz musician in an fMRI scanner



Limb CJ, Braun AR (2008) PLoS ONE 3:e1679

fMRI predicts mental states from local patterns of blood oxygen-level-dependent (BOLD) signal across voxels

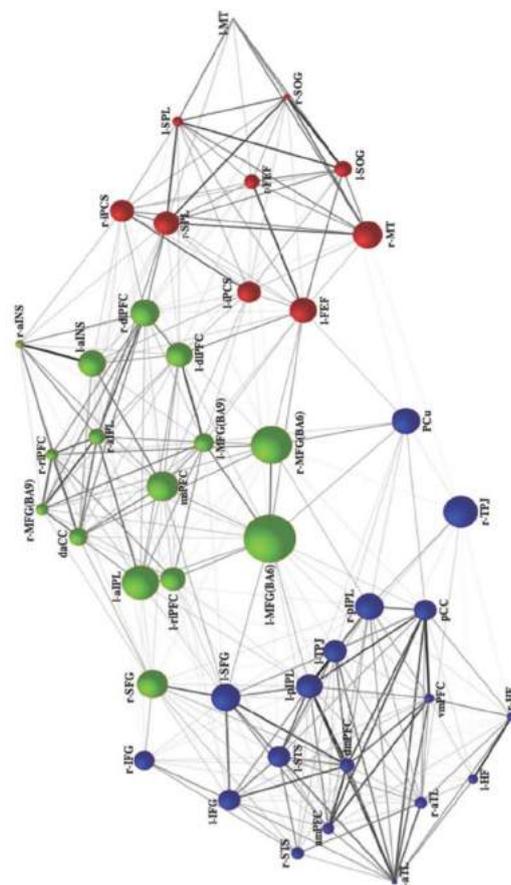
# COMPETITIVE FUNCTIONAL NETWORKS



Fox et al., PNAS, 2005; see also Yuste & Fairhall "Temporal dynamics in fMRI resting state activity", PNAS, 2015

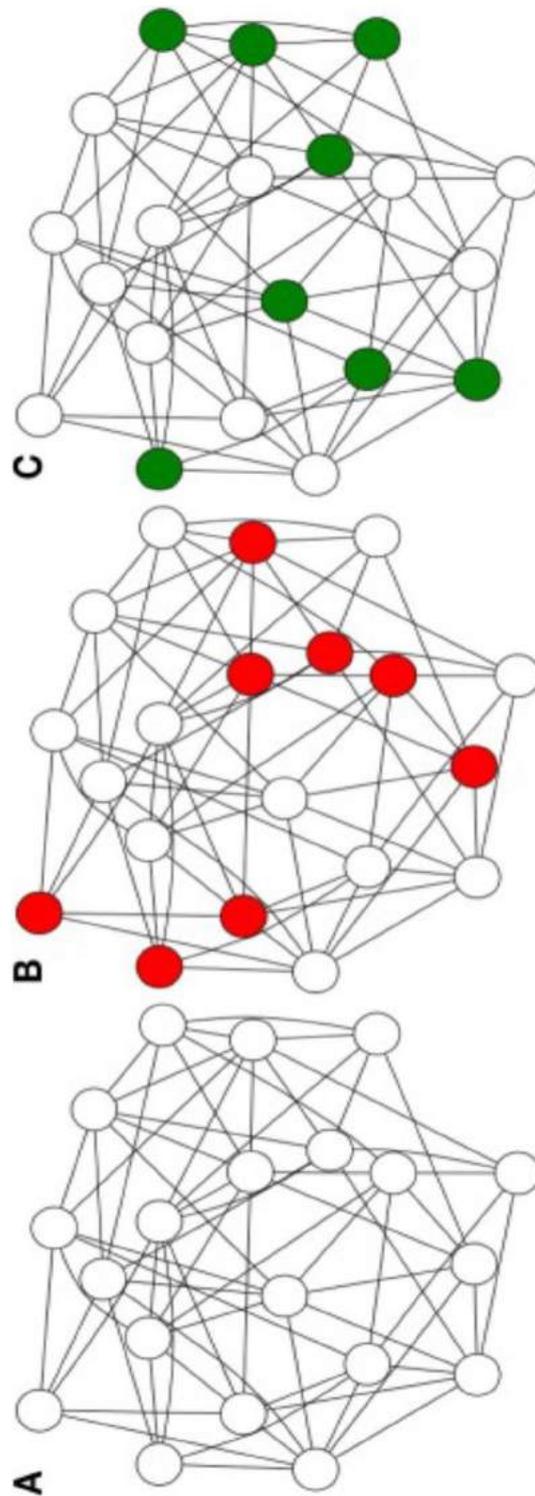
# COGNITION RESULTS FROM DYNAMIC INTERACTIONS OF DISTRIBUTED BRAIN AREAS

## Specialized global brain network interaction



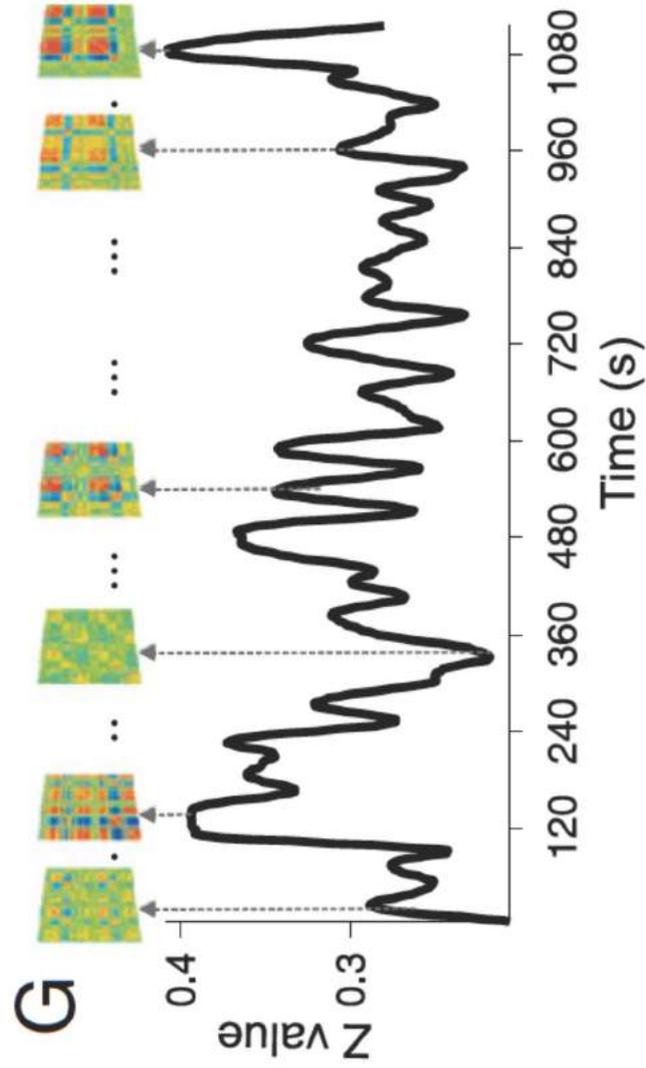
The 'dreaming-creativity' – the default network and attention-control networks connections; interregional pairwise connectivity graph within and between the default (blue), dorsal attention (red), and frontoparietal control (green) networks are shown. (see Spreng et al., 2013 *J. Cogn. Neurosci.* 25: 74–86).

# SPATIOTEMPORAL CODE FOR INFORMATION PROCESSING IN THE BRAIN



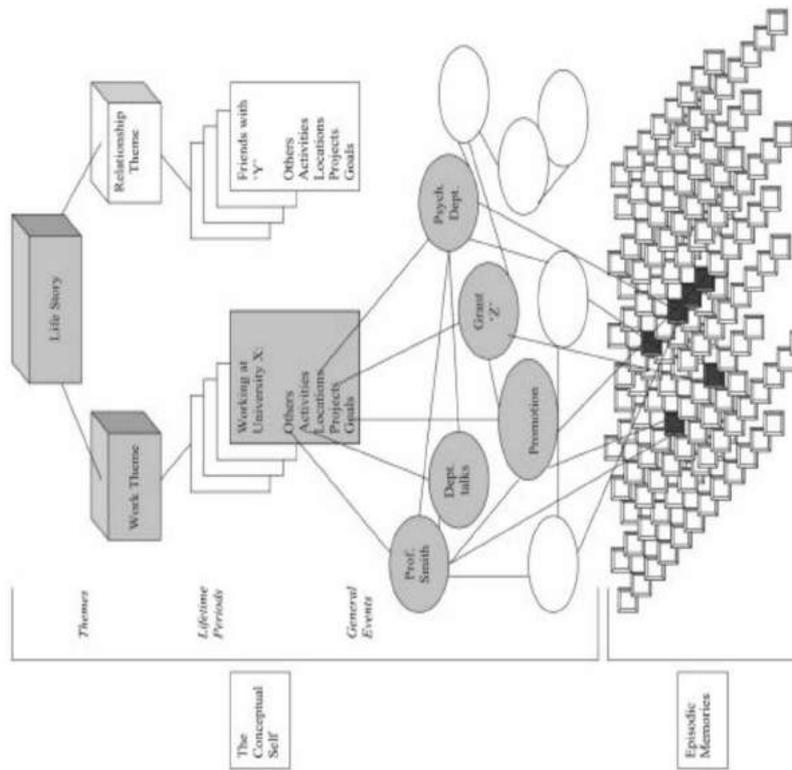
Colored nodes form different modes of functional network that are sequentially switching

## Consciousness is characterized by robust sequential dynamics of resting-state brain activity

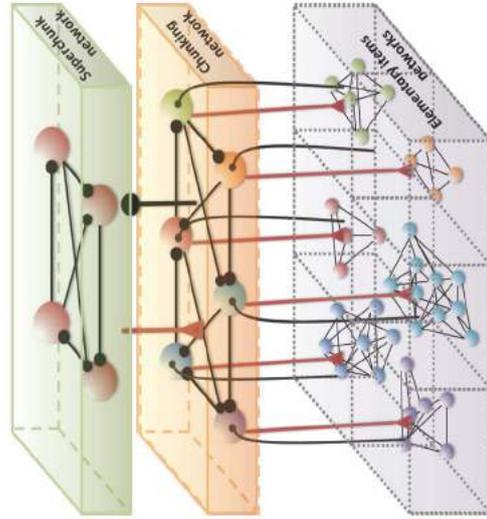


Inserted matrices show whole brain connectivity patterns at different time points.

# Hierarchical Architecture of Autobiographic Memory. Chunks



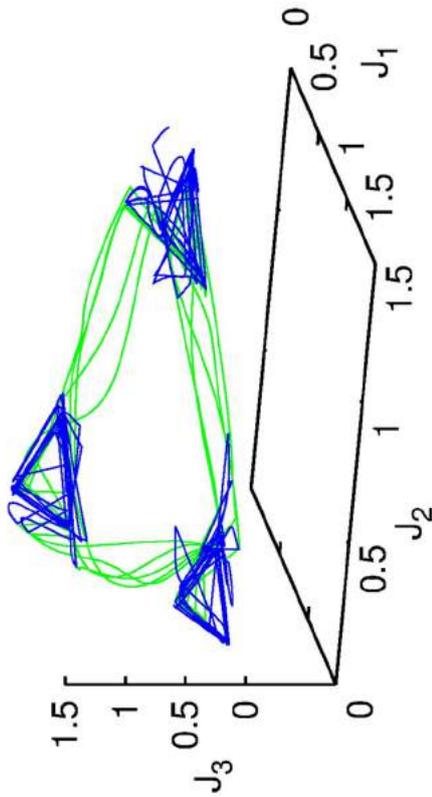
# Three Levels Hierarchy of an Autobiographic Memory: Chunk Networks



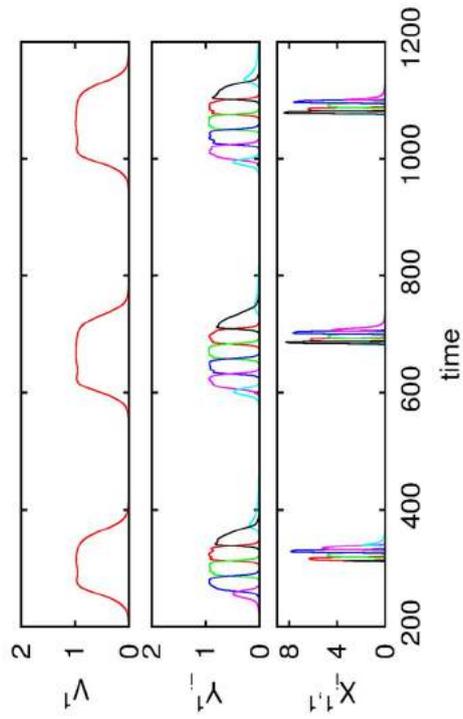
Each level of chunking (grouping) is described by its own equations connected with other levels of hierarchy

M.I. Rabinovich, P. Varona, I. Tristan, V.S. Afraimovich. [Chunking dynamics: heteroclinics in mind](#). *Frontiers in Computational Neuroscience* 8: 22, 2014.

## CHUNKING DYNAMICS

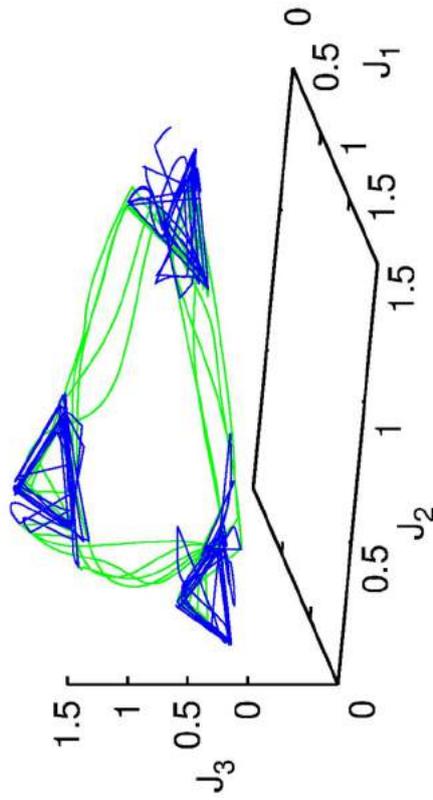


The projection of a nine-dimensional phase portrait of two-levels chunking dynamics in the space of three-dimensional auxiliary variables

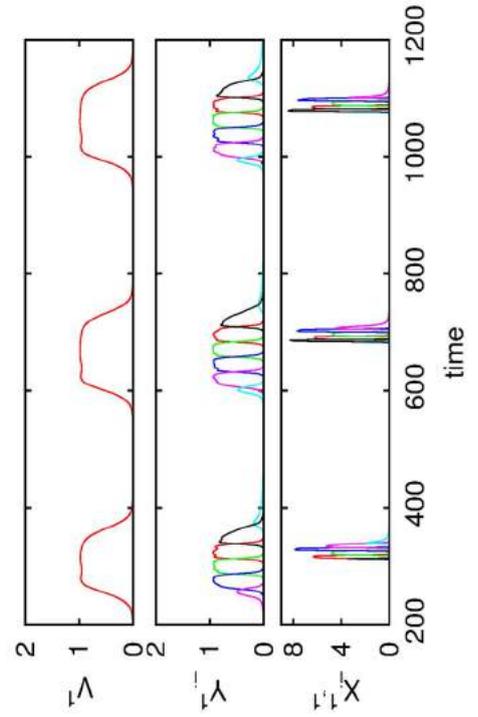


Temporal hierarchy of chunking-superchunking dynamics: time series of the sequences of the three-level hierarchy - 108 items grouped in 18 chunks of 6 items; these chunks form 3 superchunks of 6 elements each displaying reproducible dynamics

## CHUNKING DYNAMICS

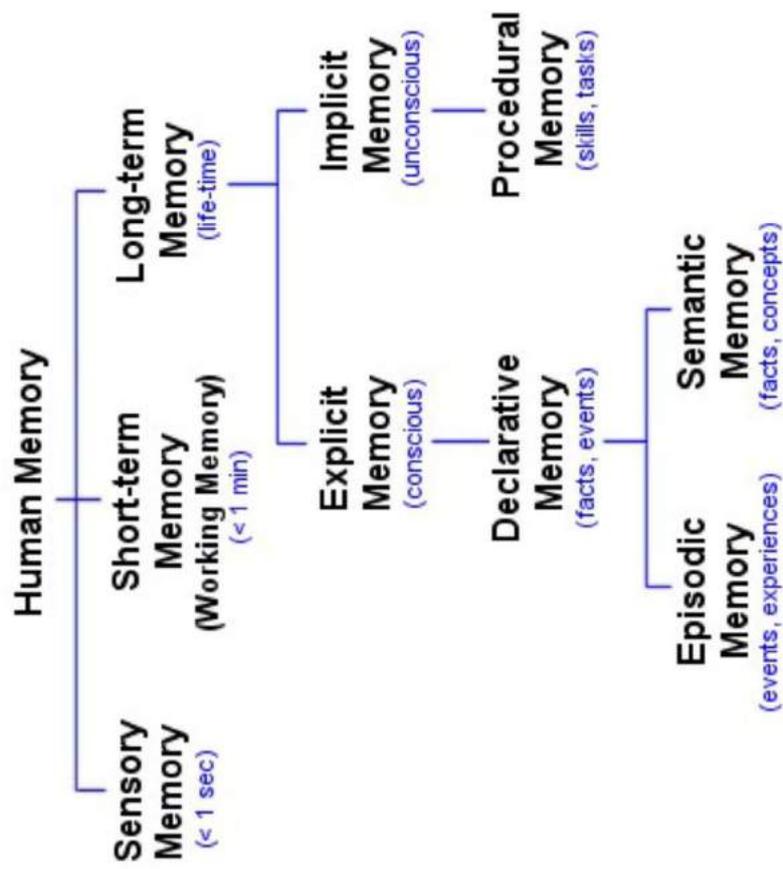


The projection of a nine-dimensional phase portrait of two-level chunking dynamics in the space of three-dimensional auxiliary variables



Temporal hierarchy of chunking-superchunking dynamics: time series of the sequences of the three-level hierarchy - 108 items grouped in 18 chunks of 6 items; these chunks form 3 superchunks of 6 elements each displaying reproducible dynamics

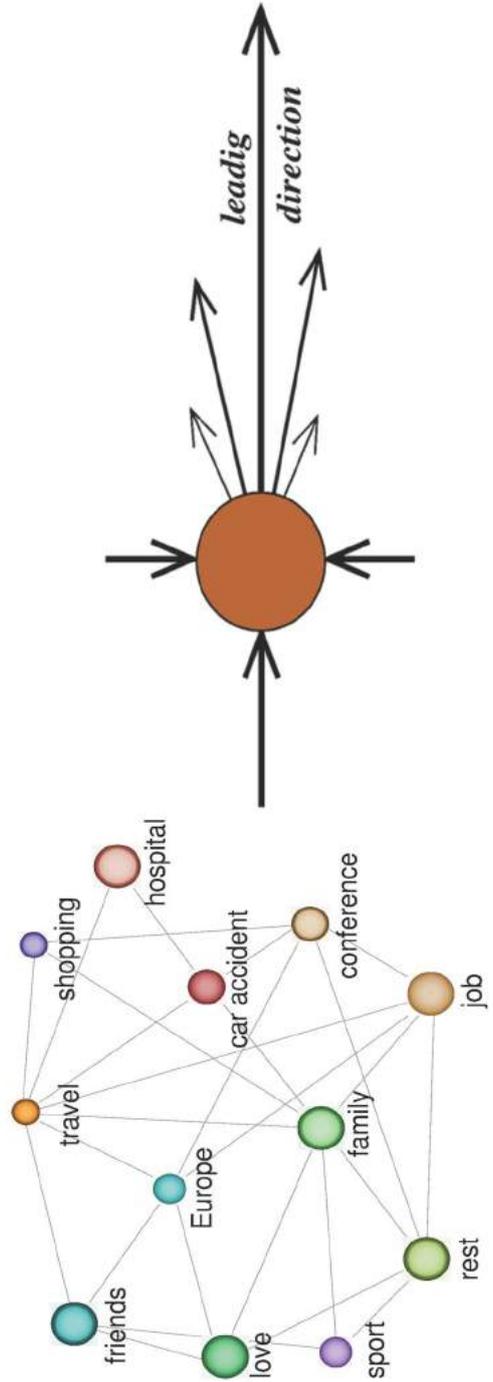
# DIFFERENT MEMORY –DIFFERENT RETRIEVAL DYNAMICS



# Semantic Chunks Instability: Origin of Creativity is a Chaotic Walk

*Left panel:* conceptual network of topic-chunks in the cognitive semantic space.

*Right panel:* metastable state with a multi dimensional unstable separatrix in the phase space of chunk dynamics.



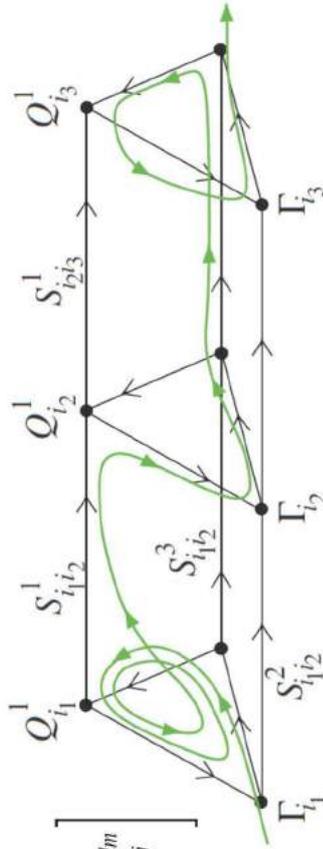


## Binding dynamics

Figure skater has to coordinate:

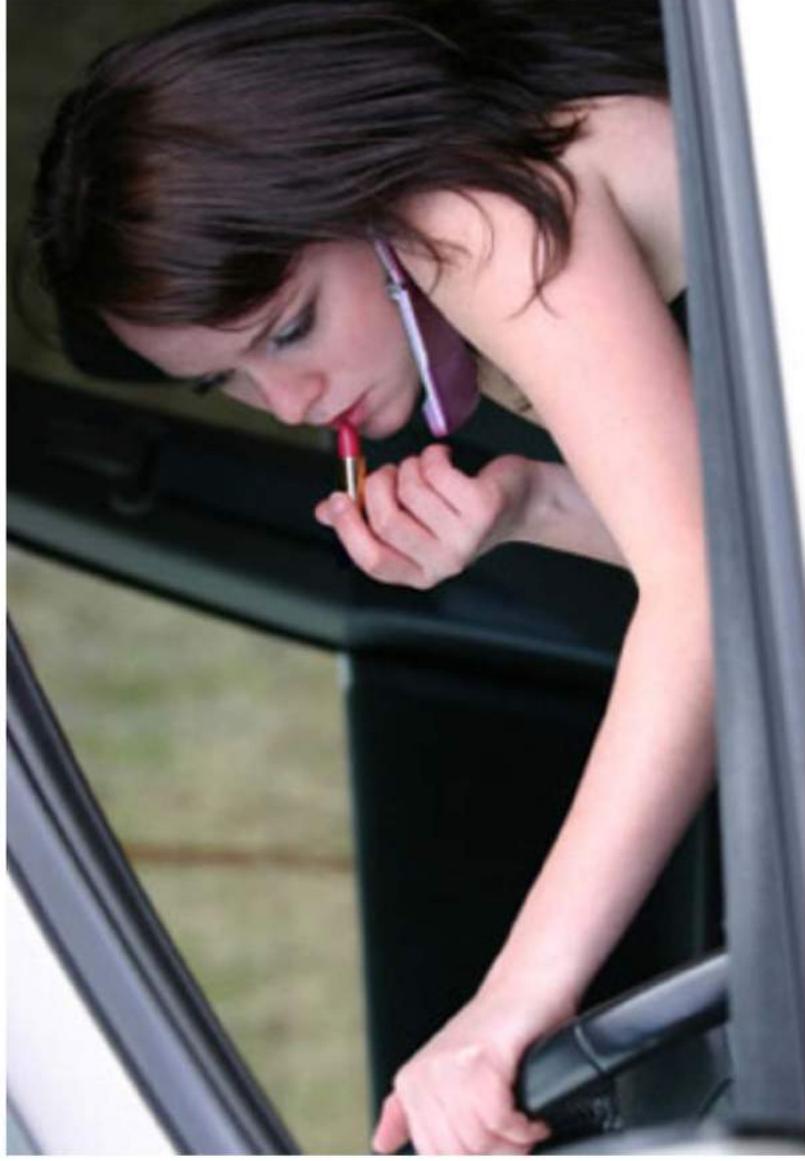
- **Skate details**
- **Music**
- **Personal emotions**

$$\tau_i \dot{X}_i^{lm} = X_i^{lm} \left[ \sigma_i^m - \sum_{j=1}^{N_{events}} \rho_{ij}^m X_j^{lm} - \sum_{j=1}^{N_{events}} \sum_{m=1}^M \xi_{ij}^m X_j^{lm} \right]$$



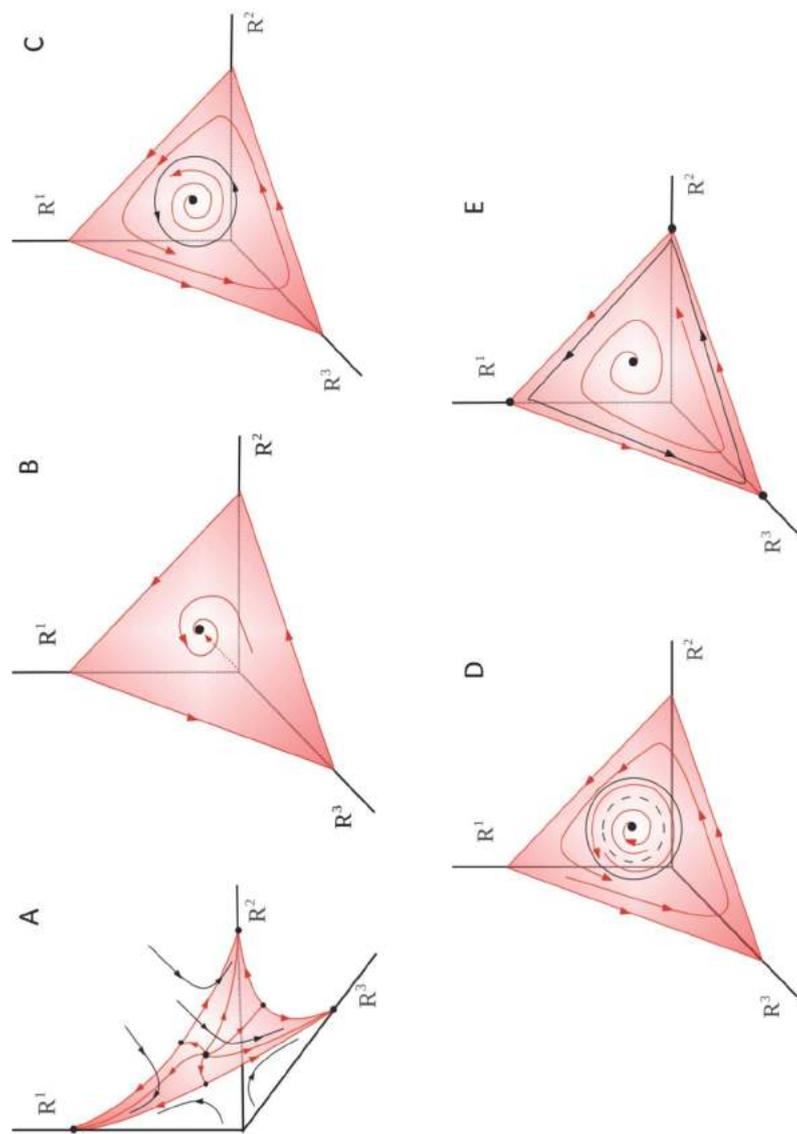
Hierarchical channel and a trajectory corresponding to the three-modality binding (Rabinovich et al., 2010)

# Attention sharing



**Sharing between voluntary (goal driven) and automatic attention**

# Cross-Modality Attention Sharing Regimes



Rabinovich, Tristan, Varona *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 55: 18–35, 2015.  
Rabinovich, Tristan, Varona. *PLoS ONE* 8(5): e64406, 2013.

## Principal components – mode's dynamics The model does not depend on the specific informational content

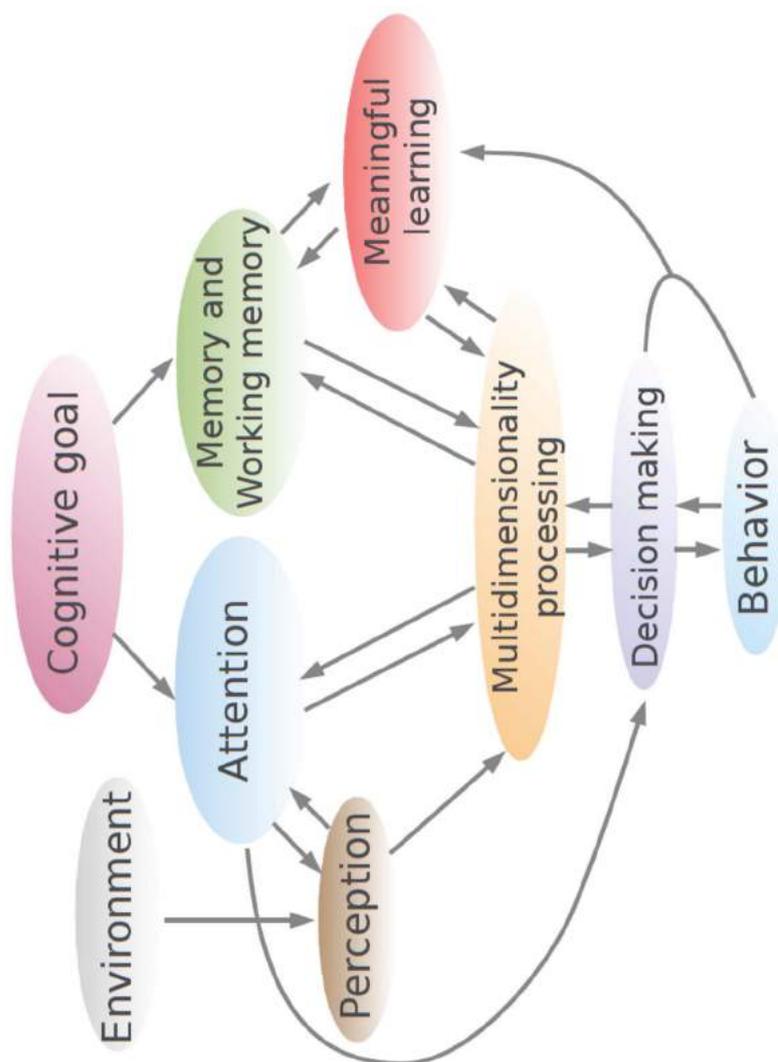
$$R(l,t) = \sum_{m=1}^M P^m(l,t)$$

$$\frac{dP^m}{dt} = P^m(l,t) \cdot \left[ \tilde{\gamma}^m - \sum_{k=1}^M \tilde{\zeta}^{mk} P^k(l,t) \right],$$

$P^m(l,t) = R^m(t)Q^m(l)$  is the  $m$ -th spatio-temporal mode that depends on time and is based on the set of discrete coordinates in the brain space (voxels coordinates),  $R^m(t)$  represents the temporal evolution of the  $m$ -th mode whose temporal structure is represented by  $Q^m(l)$ , the projection function of the  $m$ -th mode, and  $M$  is the number of modes.

# DECISION MAKING:

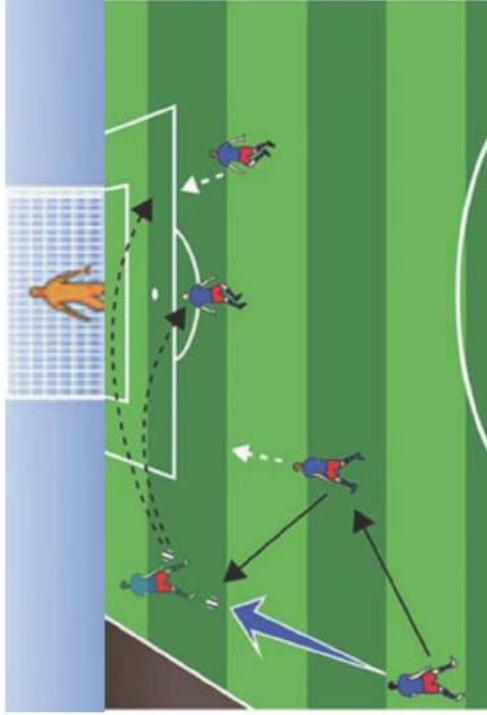
## *Cognitive modes interaction*



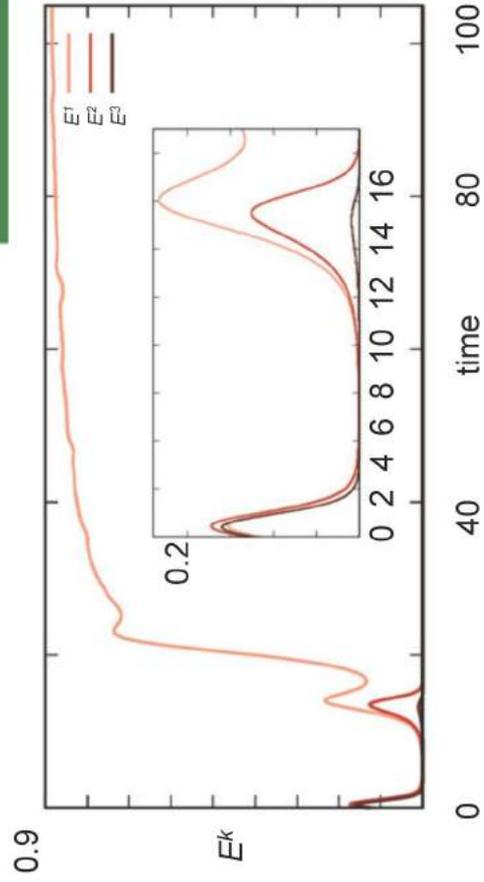
## **Episodic Memory Dynamics – Traveling in Time**

- ***Traveling in the Past* – Association with episodes:  
The successful retrieval of memory depends on a  
match between encoding information and retrieval  
cue**
- ***Traveling in the Future* – Future steps in the present  
are predicted by the similar experience in the past**
- ***When remembering the past* - or envisioning the  
future - events often come to mind in organized  
sequences or stories rather than in isolation from  
one another**

# The goalkeeper decision making



Typical attacking pattern, ball passing, in a soccer field.



Example of past episode interaction during the recall from EM.

P. Varona, M.I. Rabinovich. 2016. Hierarchical dynamics of informational patterns and decision-making. [Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences 283 \(1832\): 20160475.](#)

# Events & Episodes Dynamics

$$\dot{e}_i^0 = e_i^0 \left( \sigma_i^0 - \sum_{j=1}^{N^0 \text{ events}} \rho_{ij}^0 e_j^0 \right)$$

$$\tau \dot{e}_i^k = e_i^k \left( \sigma_i^k \cdot E^k - \sum_{j=1}^{N^k \text{ events}} \rho_{ij}^k e_j^k \right)$$

$k = 1 \dots N \text{ episodes}$

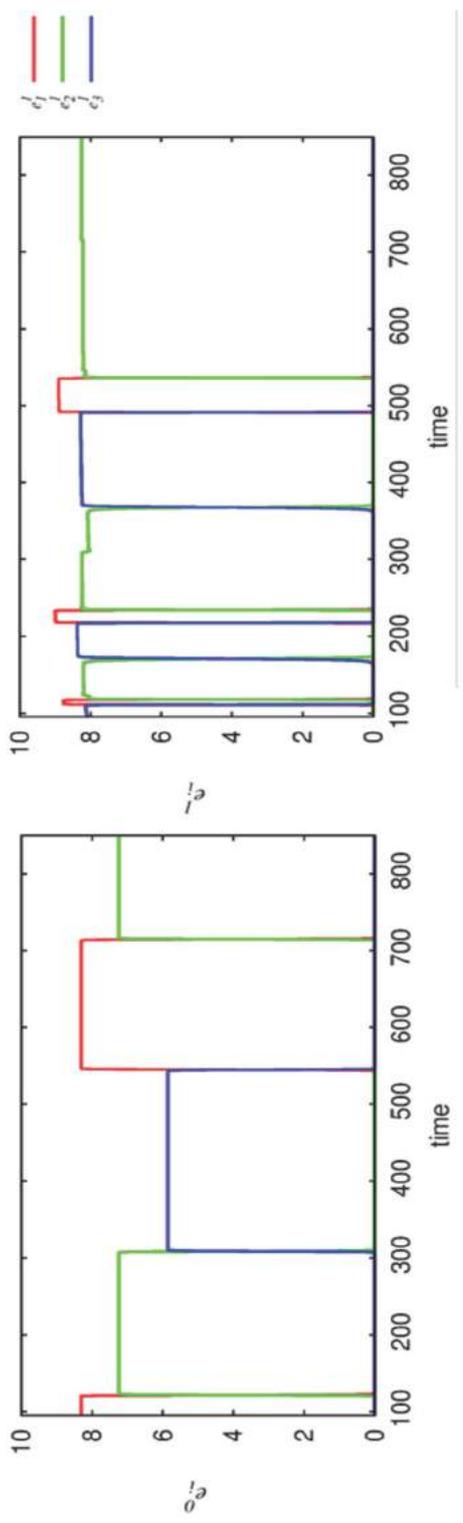
$$\tau_E \dot{E}^k = E^k \left( 1 - b \sum_{i=1}^{N^k \text{ events}} e_i^k - Z^k \right)$$

$k = 1 \dots N \text{ episodes}$

$$\theta \dot{Z}^k = \sum_{l=1}^{N \text{ episodes}} \xi^{kl} E^l - Z^k + \sum_{l \neq k} \sum_{i=1}^{N^0 \text{ events}} \beta^l e_i^0 e_i^l$$

$k = 1 \dots N \text{ episodes}$

# Computational results of Action-Based Decision-Making



Time series of the event dynamics for the non-finished present episode (eq. (3)).

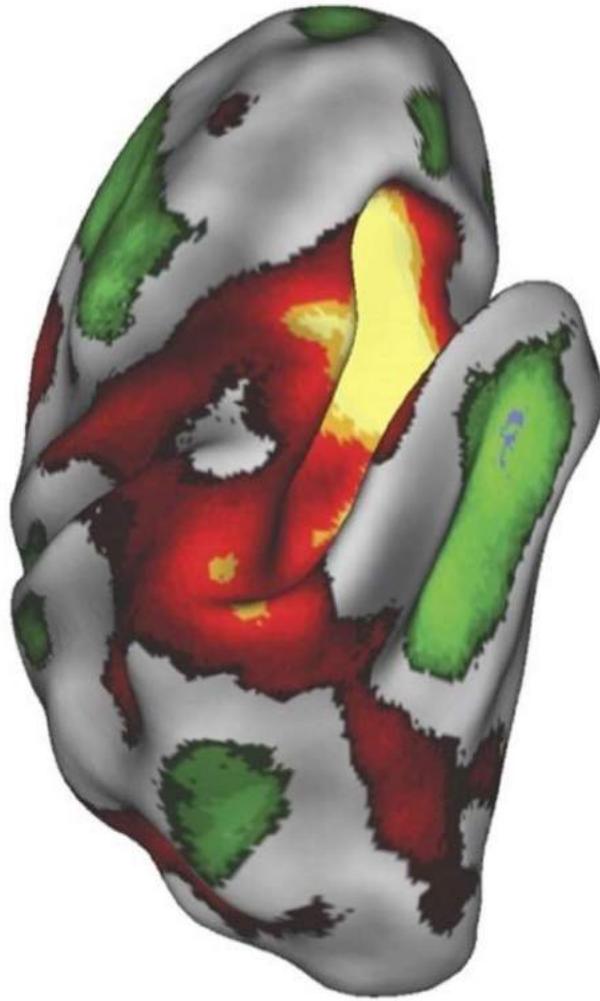
Event dynamics for the winning episode from the episodic memory.

## Creativity

is a self-generation of new thoughts, melody and other patterns characterized by a finite value of information

- Interaction between default modes network, autobiographical memory network and emotion: model of complex WLC networks with sequential dynamics
- Two mechanisms of new pattern generation:
  - (i) changing the architecture of global networks when new connections appear; the new network demonstrate new patterns or engrams, and
  - (ii) a pure dynamical mechanism related to an “a-ha” bifurcation in mental phase space when the dynamics of one mental network modulate the dynamics of another one. As a result in phase space new metastable states appear. New mental network based on them is a mathematical image of creativity

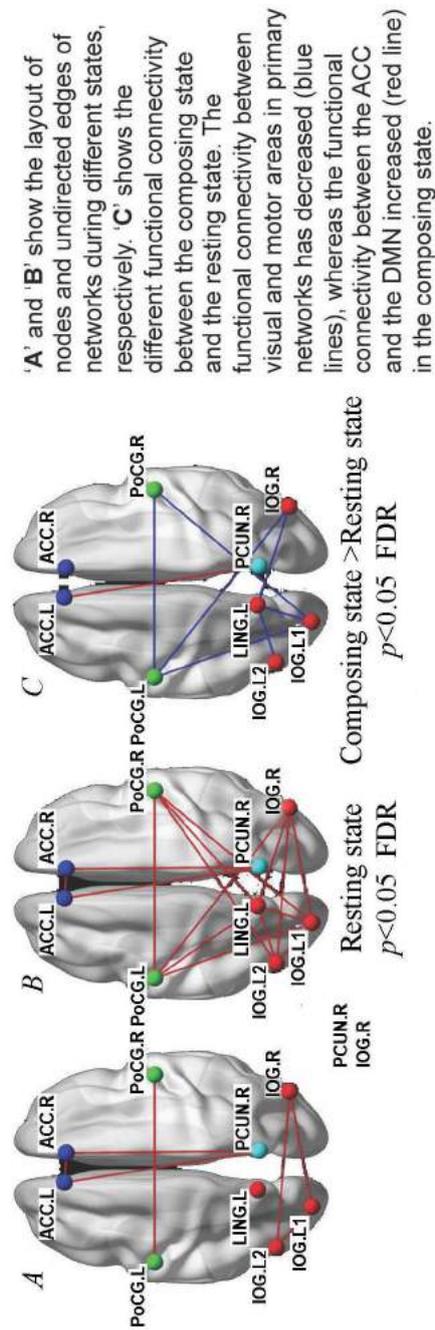
## CREATIVITY NETWORKS



Green = The Executive Attention Network; Red = The Imagination Network; Yellow  
= The Saliency Network. (National Academy of Sciences)

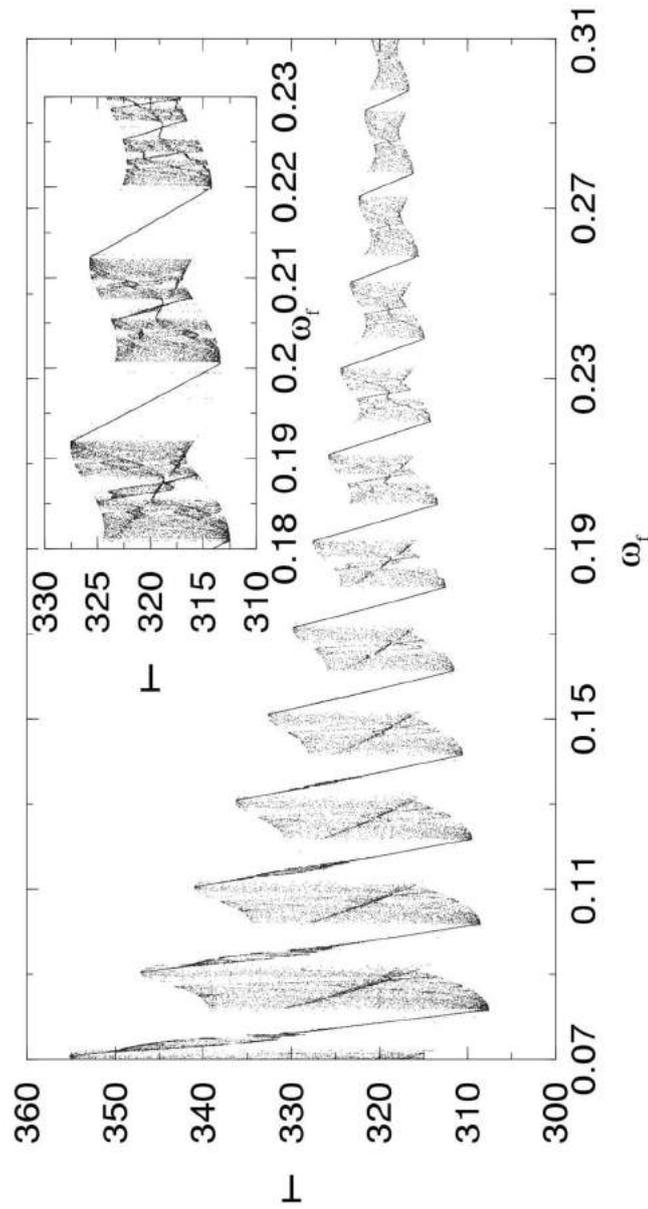
## Goal dependent reorganization of functional networks

The specific brain state of musical creation is formed when professional composers are composing, in which the integration of the primary visual and motor areas is not necessary. Instead, the neurons of these areas are recruited to enhance the functional connectivity between the anterior cingulate cortex (ACC) and the default mode network (DMN) to plan the integration of musical notes with emotion.



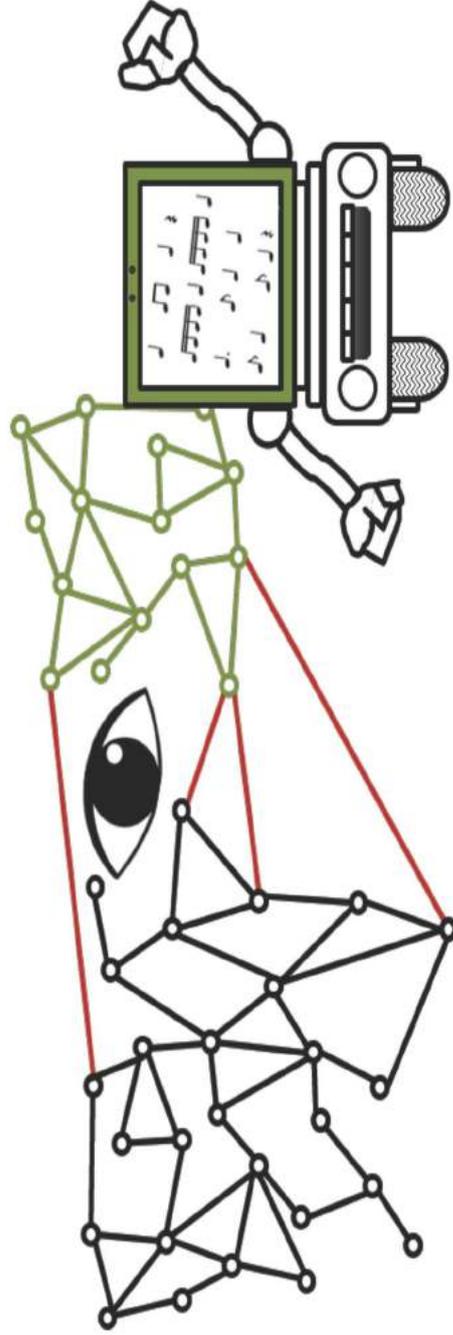
Lu et al., 2015, The Brain Functional State of Music Creation: an fMRI Study of Composers. *Scientific Reports* | 5:12277

# New informational patterns generation by rhythmic modulation of WLC activity



Rabinovich et al., PRL 2006

**Sharing of Functions Between Partners:  
robot is keeping autobiographic memory & human performs  
consciousness functions**



Cartoon architecture of joint human-robot brain networks. Human subnetworks are represented in black, robot subnetworks are represented in green.

Rabinovich & Varona, *Frontiers in Neuroscience- Neuroprostetic*, 2016 (subm.)

## HIERARCHICAL DYNAMICS OF MUSIC IMPROVISATION

$$\tau \dot{X}_i^{lm} = X_i^{lm} \left( \sigma_i^m (1 + e_i^l) - \sum_{j=1}^{N_{events}} \rho_{ij}^{lm} X_j^{lm} - \sum_{j=1}^{N_{events}} \sum_{k=1}^M \xi_{ij}^{lnk} (1 + e_i^l) X_j^{lk} \right)$$

memory retrieving  
and binding

$$\tau \dot{Y}^l = Y^l \left( 1 - b \sum_{j=1}^{N_{events}} \sum_{m=1}^M X_j^{lm} - Z^l \right)$$

chunking

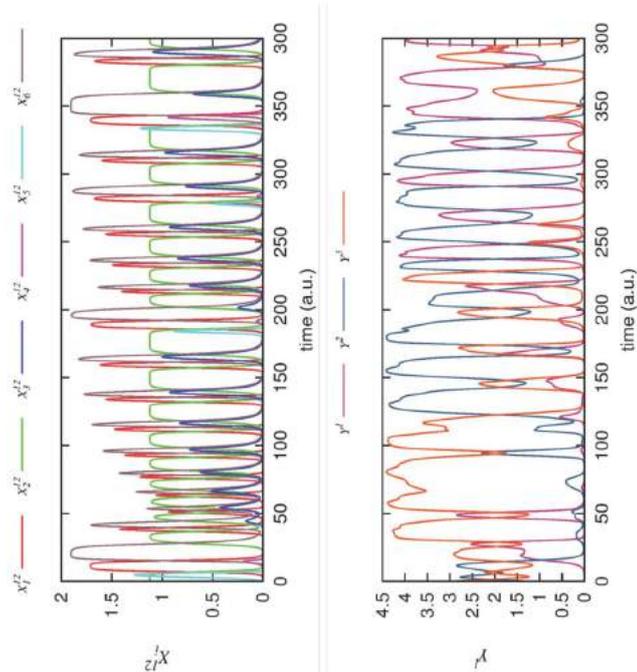
$$v \dot{Z}^l = \sum_{l=1}^{N_{episodes}} \zeta_l Y^l - Z^l + \sum_{j=1}^{N_{events}} \mu_j e_j^l$$

$$\dot{e}_i^l = e_i^l \left( \eta_i^l (X_i^{l2}) - \sum_{j=1}^{N_{events}} \theta_{ij}^l e_j^l - \sum_{j=1}^{N_{events}} \sum_{k=1}^L \alpha_j^{lk} e_j^k \right)$$

emotion-attention  
control

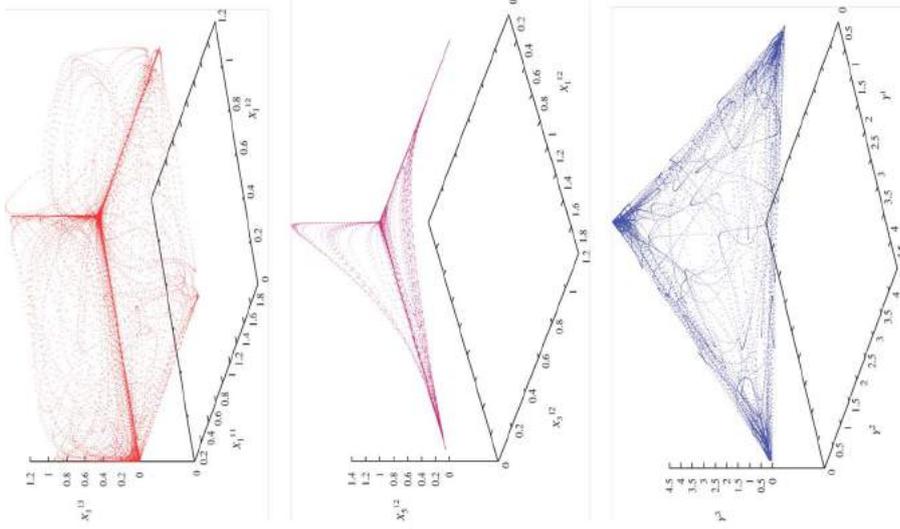
**Emotion** is a cultural and psychological adaptation mechanism which allows each individual to react flexibly and dynamically to environmental contingencies

# Modeling results

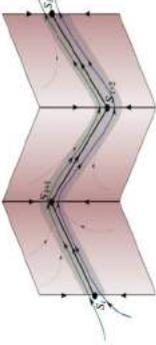
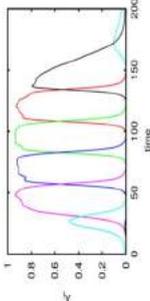
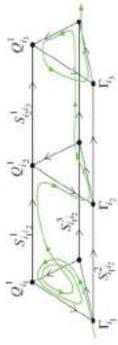
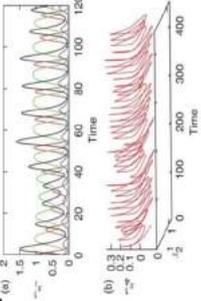
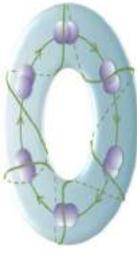
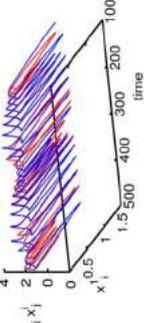
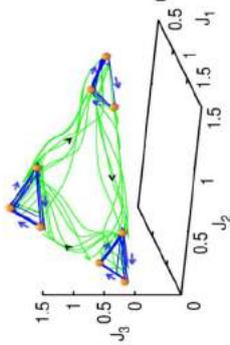
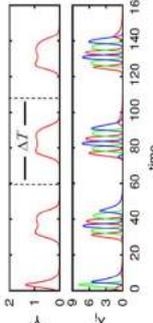


Upper panel: Example of the event dynamics –sequential time series– corresponding to the rhythm modality  $X_i^{1,2}$ ; each musical unit (event) is represented by a different color. Lower panel: associated time series for three competitive episodes  $Y^l$  ( $l=1,2,3$ ), displayed in different colors presented by a different color. Lower panel: associated time series for three competitive episodes  $Y^l$  ( $l=1,2,3$ ), displayed in different colors. Kolmogorov-Sinai entropy  $K = \sum_{\lambda_i > 0} \lambda_i$  for system (1-4) gives the value  $K=0.045$ , which is a quantitative measure of the creativity level.

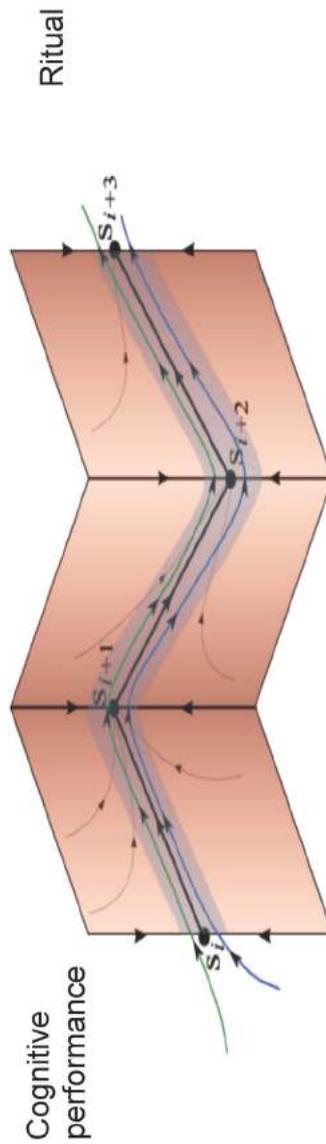
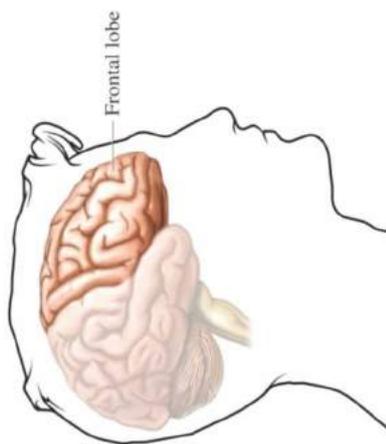
# Phase Portraits



Upper panel: phase portrait trajectory of corresponding units from different modalities  $X_1^{lm}$ . Middle panel: phase portrait trajectory for odd units in the second modality. Bottom panel: episode phase portrait.

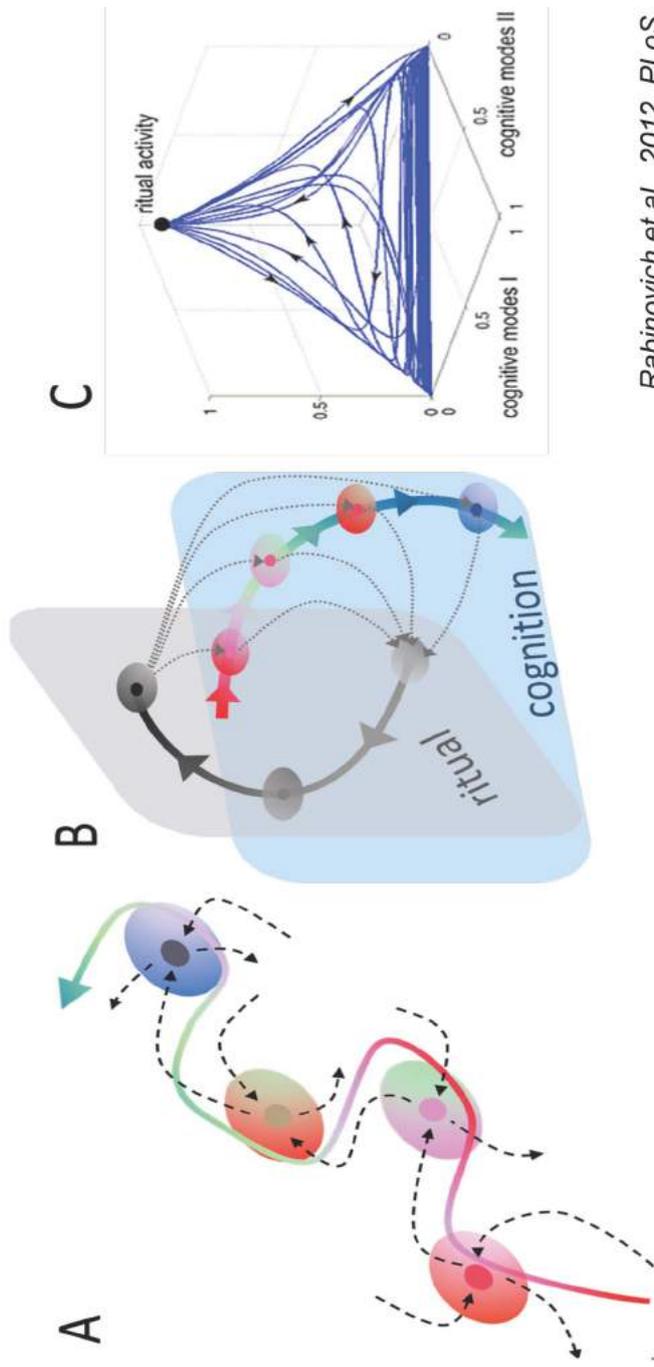
Phenomenon	Network formalism*	Phase portrait	Time series
Sequential heteroclinic switching	$\dot{X}_i = X_i \left( \sigma_i - \sum_{j=1}^M \rho_{ij} X_j \right)$		
Sequential heteroclinic binding and information flow	$\dot{X}_i^l = X_i^l \left( \sigma_i^l - \sum_{j=1}^N \rho_{ij}^l X_j^l - \sum_{m=1}^L \sum_{j=1}^N \xi_{ij}^{lm} X_j^m \right)$		
Heteroclinic cooperation	$\tau_i^m \dot{X}_i^m = X_i^m \left[ \sigma_i^m - \sum_{j=1}^M \rho_{ij}^m X_j^m + \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^M \xi_{ij}^{mk} X_j^k \right]$		
Hierarchical chunking memory and learning	$\begin{aligned} \dot{X}_i^k &= X_i^k \left( \sigma_i^k \cdot Y^k - \sum_{j=1}^{N^k} \rho_{ij}^k X_j^k \right) \\ \tau Y^k &= Y^k \left( \left( 1 - \beta \sum_{i=1}^{N^k} X_i^k \right) - Z^k \right) \\ \theta \dot{Z}^k &= \sum_{m=1}^M \xi^{km} Y^m - Z^k \end{aligned}$		

# OBSESSIVE COMPULSIVE DISORDER



Stable heteroclinic channel

# DYNAMICAL IMAGE OF OBSESSIVE COMPULSIVE DISORDER



Rabinovich et al., 2012, PLoS

THE END

В дополнение к литературе, указанной на слайдах (см.References [1–28]), рекомендуем ознакомиться с недавними публикациями по данному направлению [29–48].

## References

1. Rabinovich M.I., Simmons A.N., Varona P. Dynamical bridge between brain and mind. *Trends in Cognitive Sciences*. 2015. Vol. 19(8). Pp. 453–461.
2. Stokes M., Kusunoki M., Sigala N., Nili H., Gaffan D., Duncan J. Dynamic coding for cognitive control in prefrontal cortex. *Neuron*. 2013. Vol.78(2). Pp. 364–375.
3. Rabinovich M, Huerta R, Laurent G. Transient dynamics for neural processing. *Science*. 2008. Vol. 321(5885). Pp. 48–50.
4. Cunningham J.P., Yu B.M. Dimensionality reduction for large-scale neural recordings. *Nature Neuroscience*. 2014. DOI: 10.1038. nn.3776.
5. Rabinovich M., Volkovskii A., Lecanda P., Huerta R., Abarbanel H.D.I.; Laurent G. Dynamical encoding by networks of competing neuron groups: Winnerless competition. *Physical Review Letters*. 2001. Vol. 87(6): 068102.
6. Afraimovich V.S, Zhigulin V.P, Rabinovich M.I. On the origin of reproducible sequential activity in neural circuits. *Chaos*. 2004. Vol. 14(4). Pp. 1123–1129
7. Jones L.M., Fontanini A., Sadacca B.F., Miller P., Katz D. B. Natural stimuli evoke dynamic sequences of states in sensory cortical ensembles. *PNAS*. 2007. Vol. 104(47).
8. Limb C.J., Braun A.R. Neural substrates of spontaneous musical performance: An fMRI study of jazz improvisation. *PLoS ONE*. 2008. 3(2). doi:10.1371/journal.pone.0001679.
9. Fox M.D., Snyder A.Z., Vincent J.L., Corbetta M., Van Essen D.C., Raichle M.E. The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks. *PNAS*. 2005. Vol. 102. Pp. 9673–9678.
10. Yuste R., Fairhall A.L. Temporal dynamics in fMRI resting state activity. *PNAS*. 2015. Vol. 112(17).
11. Spreng R.N, Sepulcre J., Turner G.R., Stevens W.D., Schacter D.L. Intrinsic architecture underlying the relations among the default, dorsal attention, and frontoparietal control networks of the human brain. *J. Cogn. Neuroscience*. 2013. Vol. 25. Pp. 74–86.
12. Bartfeld P., Uhrig L., Sitt J.D., Sigman M., Jarraya B., Dehaene S. Signature of consciousness in the dynamics of resting-state brain activity. *PNAS*. 2015. Vol. 112(3). Pp. 887–892.
13. Rabinovich M.I., Varona P., Tristan I., Afraimovich V.S. Chunking dynamics: Heteroclinics in mind. *Frontiers in Computational Neuroscience*. 2014. Vol. 8(22).
14. Rabinovich MI, Afraimovich VS, Varona P. Heteroclinic binding. *Dynamical Systems*. 2010. Vol. 25(3). Pp. 433–442.
15. Rabinovich M.I., Muezzinoglu M.K., Strigo I., Bystritsky A. Dynamical principles of emotion-cognition interaction: mathematical images of mental disorders. *PLOS ONE*. 2010. Vol. 5(9): e12547.
16. Rabinovich M.I., Muezzinoglu M.K. Nonlinear dynamics of the brain: Emotion and cognition. *Physics-Uspekhi*. 2010. Vol. 53(4). Pp. 357–372.
17. Muezzinoglu M.K., Tristan I., Huerta R., Afraimovich V.S., Rabinovich M.I. Transient versus attractors in complex networks. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2010. Vol. 20(6). Pp. 1–23.
18. Muezzinoglu M.K., Vergara A., Huerta R., Rabinovich M.I. A sensor conditioning principle for odor identification. *Sensors and Actuators B-Chemical*. 2010. Vol. 146. Pp. 472–476.

19. Bick C., Rabinovich M.I. On the occurrence of stable heteroclinic channels in Lotka-Volterra models. *Dynamical Systems*. 2010. Vol. 25. Pp. 95–110.
20. Rabinovich M.I., Tristan I., Varona P. Hierarchical nonlinear dynamics of human attention. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. 2015. Vol. 55. Pp. 18–35.
21. Rabinovich M.I., Tristan I., Varona P. Neural dynamics of attentional cross-modality control. *PLOS ONE*. 2013. Vol. 8(5): e64406.
22. Varona P., Rabinovich M.I. Hierarchical dynamics of informational patterns and decision-making. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*. 2016. Vol. 283 (1832): 20160475. DOI: 10.1098/rspb.2016.0475.
23. Lu J., Yang H., Zhang X., He H., Lu C., Yao D. The brain functional state of music creation: an fMRI study of composers. *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5:12277
24. Rabinovich M.I., Huerta R., Afraimovich V.I. Dynamics of sequential decision making. *Phys. Rev Lett*. 2006. Vol. 97(18): 188103.
25. Rabinovich M.I., Huerta R., Varona P. Heteroclinic synchronization: ultrasubharmonic locking. *Phys Rev Lett*. 2006. Vol. 96(1): 014101.
26. Rabinovich M.I., Varona P. Frontiers in neuroscience-neuroprosthetic. 2016 (paper submitted.)
27. Rabinovich M.I., Afraimovich V.S., Bick C., Varona P. Information flow dynamics in the brain. *Physics of Life Reviews*. 2012. Vol. 9(1). Pp. 51–73.
28. Rabinovich M.I., Afraimovich V.S., Bick C., Varona P. Instability, semantic dynamics and modeling brain data. *Physics of Life Reviews*. 2012. Vol. 9(1). Pp. 80–83.
29. Jun Tani. Exploring Robotic Minds: Actions, Symbols, and Consciousness as Self Organizing Dynamic Phenomena. Oxford University Press, 2017.
30. Barron A.B., Klein C. What insects can tell us about the origins of consciousness. *PNAS*. 2016. May 3. Vol. 113, No. 184900-4908.
31. Key B., Arlinghaus R., Browman H.I. Insects cannot tell us anything about subjective experience or the origin of consciousness. *PNAS*. 2016. July 5. Vol. 113, No. 27E3813.
32. Koch C., Massimini M., Boly M., Tononi G. Neural correlates of consciousness: Progress and problems. *Nat. Rev. Neurosci*. 2016. Apr. Vol. 17, No. 5, Pp. 307–321.
33. Dehaene S., *Consciousness and the Brain: Deciphering How the Brain Codes Our Thoughts*. Penguin, 2014.
34. Dehaene S., Charles L., King J.R., Marti S. Toward a computational theory of conscious processing. *Curr. Opin. Neurobiol*. 2014. Vol. 25. Pp. 76-84.
35. Varona P., Rabinovich M.I. Hierarchical dynamics of informational patterns and decision making. *Proc. R. Soc. B*. 2016. Vol. 283. P. 20160475.
36. Beaty R.E., Benedek M., Silvia P.J., Schacter D.L. Creative cognition and brain network Dynamics. *Trends Cogn. Sci*. 2016. Vol. 20, No. 2. Pp. 87–95.
37. Schurger A., Gale S., Gozel Olivia, Blanke Olaf. Performance monitoring for brain-computer-interface actions. *Brain and Cognition*. 2017. Feb. Vol. 111. Pp. 44–50.
38. Sharma Shivani, Babu Nandita. Interplay between creativity, executive function and working memory in middle-aged and older adults. *Creativity Research Journal*. 2017. Vol 29. Pp. 71–77.
39. Silva Rui, Louro Luís, Malheiro Tiago, Erlhagen Wolfram, Bicho Estela. Combining intention and emotional state inference in a dynamic neural field architecture for human-robot joint action. *Adaptive Behavior*. 2016. Vol. 24(5). Pp. 350–372.
40. Beaty R.E., Silvia P.J., Benedek M. Brain networks underlying novel metaphor produc-

- tion. *Brain and Cognition*. 2017. Vol. 111. Pp. 163–170.
41. First M., Williams J., Karg R., Spitzer R. Structured clinical interview for DSM-5. Research Version. SCID-5 for DSM-5, Research Version (SCID-5-RV). American Psychiatric Association. Arlington, VA, 2015.
  42. Rabinovich M.I., Simmons A.N., Varona P. Dynamical bridge between brain and mind. *Trends Cogn. Sci.* 2015. Vol. 19, No. 8. Pp. 453–461.
  43. Rabinovich M.I., Sokolov Y., Kozma R. Robust sequential working memory recall in heterogeneous cognitive networks. *Front. Syst. Neurosci.* 2014. Jan. Vol. 8. P. 220.
  44. Rabinovich M.I., Varona P. Functional dynamical networks in joint human-robot creativity. *Front. Comput. Neurosci.* 2017 (paper submitted).
  45. Barttfeld P., Uhrig L., Sitt J.D., Sigman M., Jarraya B., Dehaene S. Signature of consciousness in the dynamics of resting-state brain activity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2015. Jan. Vol. 112, No. 3. Pp. 887–892.
  46. Lu J., Yang H., Zhang X., He H., Luo C., Yao D. The brain functional state of music creation: An fMRI study of composers. *Sci. Rep.* 2015. Jan. Vol. 5. P. 12277.
  47. Bajaj S., Adhikari B. M., Friston K. J., Dhamala M. Bridging the gap: Dynamic causal modeling and granger causality analysis of resting state functional magnetic resonance imaging. *Brain Connect.* 2016. Jan. Vol. 6, No. 8. Pp. 652–661.
  48. Andrews-Hanna J.R., Smallwood J., Spreng R.N. The default network and self-generated thought: Component processes, dynamic control, and clinical relevance. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2014. 1316. Pp. 29–52.

*Поступила в редакцию 20.02.2017*

*Михаил Израилевич Рабинович* (род. 20 апреля 1941, Горький, Горьковская область, РСФСР) – советский и американский учёный-физик, доктор физико-математических наук, специалист по теории колебаний и волн, динамическому хаосу и теории турбулентности, физике классических нелинейных полей. Пишет стихи. Доктор физ.-мат. наук (1974), профессор (1980), чл.-корр. АН СССР (1991). В 1990 работал в качестве приглашенного профессора в Чикагском университете, с 1991 – профессор Калифорнийского университета в Сан-Диего. Основатель и Президент Международного центра Перспективных Исследований (Нижний Новгород, 1994-2002). С 2004 года живет в США. Область научных интересов – прикладная математика, динамический хаос и теория турбулентности, нелинейная динамика классических полей, нейродинамика и динамика когнитивных процессов. Автор более двухсот научных работ и пяти монографий.



US, UCSD, 9500 Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0328  
BioCircuits Institute  
E-mail: mrabinovich@gmail.com

*Pablo Varona* received his degree in Theoretical Physics in 1992 and the PhD in Computer Science in 1997 from Universidad Autonoma de Madrid (UAM). He was a postdoc and later an assistant research scientist at the Institute for Nonlinear Science, University of California, San Diego. Since 2002 he is an associate professor at the Escuela Politecnica Superior, UAM. Among his main research interests are transient dynamics in neural systems, the design of novel activity-dependent stimulation protocols for neuroscience research, and bio-inspired neural networks, robotics and devices.



C Francisco Tomás y Valiente, 11, 28049 Madrid, Spain  
Universidad Autónoma de Madrid  
E-mail: pablo.varona@uam.es