

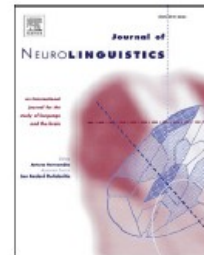


ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Journal of Neurolinguistics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jneuroling

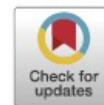


ROSE: A neurocomputational architecture for syntax

Elliot Murphy^{a,b,*}

^a Vivian L. Smith Department of Neurosurgery, McGovern Medical School, UTHealth, 1133 John Freeman Blvd, Houston, TX, 77030, USA

^b Texas Institute for Restorative Neurotechnologies, UTHealth, 1133 John Freeman Blvd, Houston, TX, 77030, USA



Apresentador: Nilton Melo

Introdução

- Língua como um mecanismo cognitivo unicamente humano
- Sintaxe: múltiplos itens linguísticos organizados de maneira hierárquica. Regula a interpretação composicional desses itens
- Labeling, MERGE, estrutura hierárquica
- Oscilações refletem computação, processamento cognitivo
- Sincronização dessas oscilações refletem computação “conjunta” de diferentes tecidos cerebrais

Introdução

- Diferentemente de outras áreas das ciências cognitivas (tais como memória), a Linguística tem avançado pouco na identificação dos diferentes padrões oscilatórios que podem subjazer às computações que permitem o pleno funcionamento da FL
- Objetivo do artigo:
 - apresentar uma explicação mecanicista, baseada nos diferentes padrões oscilatórios que subjazem à computação sintática de maneira a aproximar a Linguística Teórica das Neurociências

Cracking the neural code for syntax

- Nos últimos anos têm havido um esforço no campo da Neurolinguística para encontrar um “hub sintático”
- Metodologias não invasivas: paradigmas experimentais baseados na fragmentação de regras sintáticas, têm obtido êxito em capturar a *associação entre coerência de fases de frequências mais lentas com estruturas hierárquicas*
- Metodologias invasivas: tem maior foco na busca de frequências de banda mais altas, têm encontrado *correlatos de processos linguísticos básicos e categorias conceituais*

Cracking the neural code for syntax

- Uma compreensão da relação entre oscilações de frequências mais baixas e oscilações de frequências mais altas no que diz respeito à computação linguística ainda não está no horizonte
 - Oscilações neurais refletem as flutuações sincronizadas da excitabilidade neuronal
 - Oscilações lentas: sincronização inter(regional)
comunicação entre diferentes locus corticais
 - Oscilações rápidas (γ): processamento neuronal local
- δ : 0.5 – 4 Hz
 θ : 4 – 8 Hz
 α : 8 – 12 Hz
 β : 12 – 30 Hz
Low γ : 30 – 60 Hz
High γ : 60 – 200 Hz

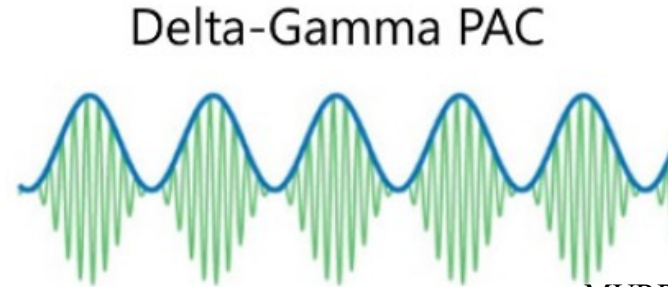
Cracking the neural code for syntax

- Sincronização neuronal ocorre por duas vias:
 - i: por meio do acoplamento sináptico de neurônios inibitórios;
 - ii: por meio do acoplamento de neurônios inibitórios e excitatórios por meio de recuos e avanços (feedforward and feedback)
- Um modelo de composicionalidade sintática é apresentado em seu livro *The Oscillatory Nature of Language*
- Esse mecanismo é implementado via ... (MURPHY, 2021, p.2)

[...] *Linguistic combination of features is achieved via the top-down coordination of faster rhythms from slower rhythms [bottom-up]*

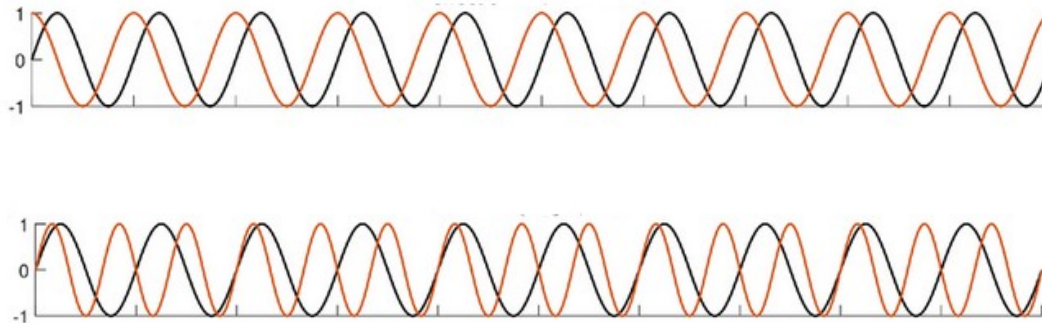
Cracking the neural code for syntax

- *Phase-amplitude coupling (PAC):*



MURPHY, 2024, 16

- Coerência oscilatória:



Cracking the neural code for syntax

- Murphy (2020a) propõe que a conversão de traços linguísticos em unidades lexicais se dá por meio do acoplamento de fase-amplitude entre frequências δ - θ inter regionais.
- Este código neural (acoplamento de fase-amplitude entre δ - θ) impõe a maneira que mecanismos neurais subsequentes vão “ler” essas unidades geradas.
- δ ativando categorias sintáticas superordenadas (top-down) e θ ativando feixes de traços advindos do acesso lexical (bottom-up)
- Esse complexo pode ser reiniciado (*phase-resetting*), seja pelo *reset* desse acoplamento entre δ - θ , seja pela liberação de espaço depois que um determinado item linguístico for “codificado/memorizado”.
- Um acoplamento de fase-amplitude entre δ - β (β estando associada ao cortex frontal inferior) e θ - γ (a frequência γ estando associada a múltiplas áreas corticais de armazenamento de informações conceituais) são respectivamente relacionados a predição sintática e a composição conceitual (*conceptual binding*).

Cracking the neural code for syntax

- *Traveling oscillations*: são um tipo de oscilação que “viaja” por diferentes áreas corticais (um caminho) mantendo a coerência de fase – quando o padrão de disparos é sincronizado/coordenado - por todo o percurso da oscilação viajante
- A cada ciclo de δ viajante entre os córtex temporal esquerdo e inferior frontal constrói-se um espaço de trabalho sintático à medida que complexos θ são sincronizados com δ . O autor propõe que essas ondas δ viajantes são responsáveis pela padronização de picos de múltiplas unidades lexicais dentro desse ciclo de δ viajante
- δ portanto coordena a construção sintagmática enquanto o complexo θ - γ é responsável pela construção representacional dos traços linguísticos que vão compor os itens lexicais dentro de δ
- O acoplamento de δ - γ na proposta do autor serviria à composicionalidade combinatorial dos traços, sendo esse um mecanismo geral utilizado em outras cognições humanas
- Dekydtspotter et al. (2023) encontraram evidências de processamento sintático em β a partir de gravações de EEG sobre a resolução da anáfora em sucessivos movimentos QU entre falantes nativos e não-nativos do francês, reforçando o proposto em Murphy (2020a)

Cracking the neural code for syntax

- Murphy repete a pergunta de Ding (2022):

What type of neural activity, such as low-frequency activity, high power, or spiking rate, can track very long or very brief phrases?

- E responde ...

atividades de baixa frequência são responsáveis pela formação das estruturas

γ de altas amplitudes/poder: operações

spiking rates: responsável pela representação das unidades básicas

Current Neural Models of Syntax

- O autor revisita brevemente outros modelos neurais de computação sintática apontando especificamente as “ausências” em uma abordagem computacionalmente explicativa
- Novos modelos devem ser disruptivos e desafiar os limites da disciplina
- Modelos existentes: muito localizacionismo, pouca neurofisiologia
- Um bom modelo da computação sintática a nível cerebral deve dar conta:

Representações
Operações
eStrutura
En/codificação

Current Neural Models of Syntax

- Friederici (2015) oferece uma abordagem para a estrutura e a codificação, mas não elabora uma explicação eletro/neurofisiológica para representação e operação.
- Murphy (2020a) considera apenas aspectos de O e S, mas deixa de lado questões relacionadas a R e E.
- Matchin & Hickock (2020): levam em conta a localização de O e S, mas dão menos ênfase a E. Vale ressaltar contudo que o modelo de Matchin & Hickok apresenta uma boa explicação dos processos engajados no córtex frontal inferior (linearização morfosintática) e na parte posterior do lobo temporal (informação léxico-sintática)
- Krasuka & Lau (2022) consideram todos os aspectos computacionais e algorítmicos de ROSE, mas deixam de lado uma explicação implementacional.
- Goucha et al. (2017) foca no aspecto da rotulagem (*labeling*) e sua importância na construção de estruturas hierárquicas, desenvolvendo uma explicação da implementação de S e E, porém desconsideração R e O.
- Pyllkanen (2019) apresenta uma explicação computacional sobre a interação entre estrutura e significado, O e S, mas deixa de lado questões referentes a R e E.

Current Neural Models of Syntax

- Martin (2020) apresenta uma explicação da atividade de γ com o acesso à “memória linguística” (R) a partir de pistas acústicas mínimas, mas não apresenta um meio de conectar os diferentes componentes de ROSE.
- Com relação à proposta de Friederici de que a operação MERGE estaria situada na área BA44, o autor argumenta que achados de gravações intracraniais e dados de lesão cerebral apontam para um caminho diferente. O que parece, de fato, é que BA44 está mais relacionada à complexidade sintática do que à construção de elementos linguísticos básicos (MERGE), sendo a parte posterior do cortex temporal o *locus* em que essas operações combinatoriais básicas acontece.
- O modelo de Memory Unification Control (MCU, Haggort, 2005, 2013) leva em consideração O e E, porém deixa de lado R e S.
- O trabalho de Dehaene e colegas (2015, 2022) foca principalmente em R e O, contudo, não apresenta um link entre eles. Vale salientar contudo que no trabalho de Dehaene e colegas fica em aberto onde e como seriam essas assinaturas sintáticas, o que ser bom para testar diferentes hipóteses mas dificulta a delimitação de um espaço mais restrito de investigação específico da sintaxe.

ROSE

- Uma boa explicação da computação sintática deve conter ROSE.
- Unidades atômicas manipuláveis pelo sistema computacional/algorítmico;
- Mecanismos que permitem a manipulação e transformação dessas unidades atômicas;
- Arranjos dessas representações em relações hierárquicas (e as relações resultantes desse arranjo)
- Um espaço de trabalho que permita a execução em tempo real da manipulação hierárquica dessas representações

ROSE

- Cada um dos componentes de ROSE são dependentes da realização do seu item à esquerda (MURPHY, 2024, 4)

Without atomic representations, we can execute no operations over them; without these operations, we can build no larger structures; and without a means to encode structures, we can generate no relations between elements within and across structures.

ROSE

- Representação se refere a todo objeto manipulável pelo sistema computacional/gerativo: traços conceituais e traços sintáticos/funcionais
- Traços sintáticos (R) podem impor restrições aos tipos de operações (O) que podem ser aplicada em domínios estruturais que contenham sua presença
- A aplicação recursiva de MERGE sobre essas R, as coloca em uma “memória de trabalho sintático” na qual S e E entram em ação.

ROSE

R: Single-unit encoding of conceptual features and formal syntactic features. This level involves a cellular barcode for distinct features that compose into syntactic objects coherently bound by high γ at O. It also involves vector codes for ensembles hosting features common to objects represented at O and that are ultimately coordinated by S.

O: High γ sensorimotor transformations into lexicalized objects (core network nodes: mid-fusiform cortex, orbitofrontal cortex, middle temporal gyrus, inferior frontal cortex, intraparietal sulcus) accessible to δ/θ phase-locking. This level can implement the semantic composition of language-specific concepts (minimal phrase schemes) that coordinate the firing of R units. High γ activates assemblies of distinct units hosting the barcode or vector code for units $R_1 \dots R_n$ that compose into feature-bundles.

S: A low frequency neural program for generating structural inferences over O. δ - θ phase-amplitude coupling (posterior superior temporal sulcus to inferior frontal gyrus) for categorial inferences modulating the representation of feature-bundles in θ - γ by structuring the read-out of these complexes (frontotemporal language sites to cross-modular hubs).

E: Local and global workspaces for bottom-up lexical memory and top-down hierarchical memory. Traveling waves implement δ - θ coupling for hierarchical memory, and θ - γ coupling for lexical memory. α power codes for workspace ‘disruption’ (posterior temporal and inferior frontal cortex). β power coding for syntactic predictions (inferior frontal cortex).

ROSE

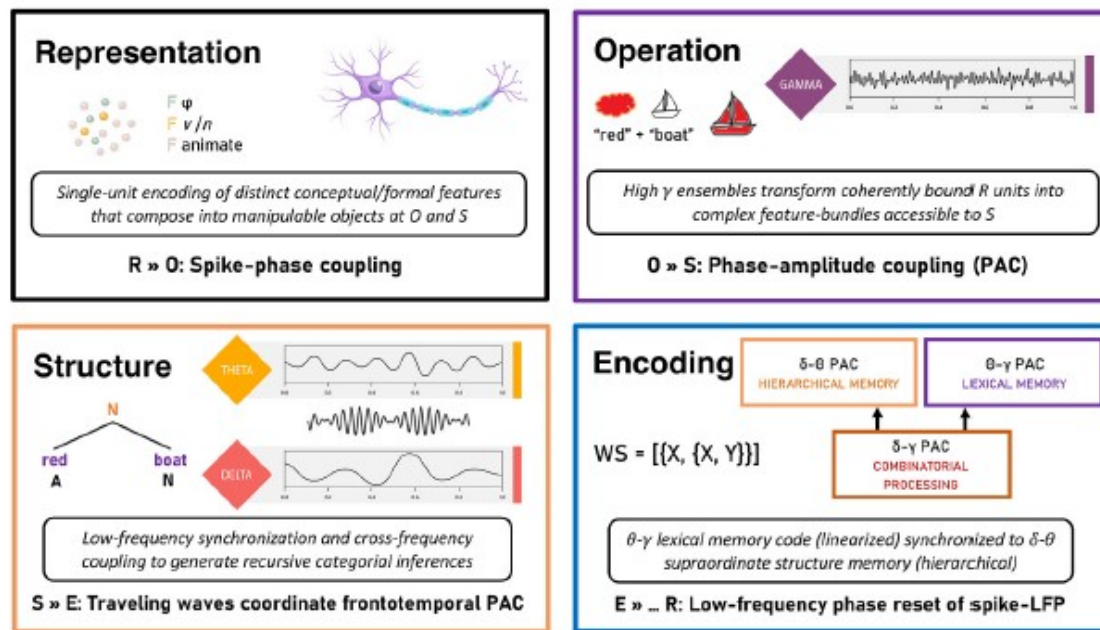


Fig. 1. Basic components of the ROSE model. Each box contains a graphical depiction of the relevant organizational scale (top), a description of how each scale relates to the relevant component of language (middle, boxed text), and the putative mechanistic link between components (bottom text). Components are named representation (R), operation (O), structure (S), encoding (E). The colored boxes in the Encoding component (hierarchical memory, lexical memory) correspond to the colors of the level of linguistic representation they are associated with (i.e., S for hierarchical memory, O for lexical memory).

Representation

- Pesquisas recentes têm apontado a existência de neurônios que são sensíveis a informações muito específicas: faces, tempo, animacidade, ...
- Murphy sugere que representações atômicas entram na computação linguística por meio de “*small ensembles of temporarily cooperating neurons*”
- *Semantic features of lexical items likely “combine sparse codes with the flexibility and combinatorial richness of assembly codes” (Friederici & Singer, 2015), with semantically related items exhibiting overlapping single-unit responses across medial temporal and lateral posterior middle temporal cortices, depending on approximation to canonical categories that these regions seem sensitive to [...] posterior middle temporal cortex may serve language-specific representational features, such as abstract word meaning, and may be **involved in lexicalization of non-linguistic concept** (p. 6)*

Representation

- A ativação de determinadas representações está vinculada ao tipo de demanda/tarefa sendo executada
- ESCALA DE ATIVIDADE NO MAPEAMENTO DE R PARA O:

SUA (single-unit activity): Extracellularly-recorded activity of an individual neuron.

MUA (multi-unit activity): Multiple neurons, between ~ 50 and $300 \mu\text{m}$ (Buzsáki, 2004).

ESA (envelope of spiking activity): The envelope of MUA (Ahmadi et al., 2021).

LFP (local field potential): Mesoscopic, large number of neurons, from $\sim 250\mu$ to several millimeters (Buzsáki et al., 2012).

Basic Units/Mapping R to O

- O conceito de *palavra*, como um primitivo linguístico, apresenta problemas
- Traços conceituais e morfossintáticos compõem a menor unidade no modelo proposto pelo autor
- *[...] Distinct syntactic and semantic features can be encoded at the cellular level (p.7)*
- *Spike/LFP coupling* como o mecanismo que seleciona esses traços
- *Local field potentials (LFPs) reflect the common synaptic activity of a population of neighboring neurons [...]. Spikes are short-timed high-frequency content signals reflecting individual cellular activity. Neural synchronization can be evinced by temporally relating spiking activity to the background oscillations of LFPs [...] (p.7)*

Basic Units/Mapping R to O

- *At this point, it is important to stress a clear, falsifiable element of ROSE. I am hypothesizing that representation-specific information bits will be detected in future single-unit research, but that this type of electrophysiological research will not detect supralexical, structural information (e.g., the S in ROSE). I am also predicting domain-specific effects in spike-LFP coupling for lexicality. (p, 8)*

Gain-field mechanisms

- *Gain filed mechanisms* podem unir informação de diferentes áreas corticais
- Esse tipo de mecanismo pode ser um dos modos pelo qual traços lexicais (conceituais e morfossintáticos) podem ser “agrupados” para gerar um item manipulável pela sintaxe
- pSTS e pMTG como candidatos para acomodar esse *gain filed mechanism* em razão de sua conectividade a regiões que processam informação conceitual (LATL) e informação temática (AG)
- *A common set of mechanisms for gain modulation have also been identified: GABAergic inhibition, synaptically driven fluctuations in membrane potential, and changes in cellular conductance (Ferguson & Cardin, 2020). (p.8)*

Gain-field mechanisms

- O autor salienta, contudo, que a identificação de processamento de informação por meio da medição de atividade neuronal não é tão direta
- *As Trettenbrein (2016) summarizes the relevant literature: “[M]emory persists despite synapses having been destroyed and synapses are turning over at very high rates even when nothing is being learned”. Pursuing this intuition, Ryan et al. (2015) suggest that synapses should be understood as providing “access points” to information already stored within cells (p.9)*
- R e R-O parece codificar informação do nível celular ao nível de população neuronal, com diferentes mecanismos de geração de uma unidade linguística estando vinculado a diferentes escalas neuronais.

Operation

- *High γ is assumed to index local cortical activity (multi-unit activity) (Leszczyński et al., 2020). Adopting assumptions in Murphy (2020a), narrowband and broadband γ parcellate representations of distinct complexity during coupling with low frequencies such as α and θ , such that broadband γ transforms complex linguistic features and narrowband γ extracts more elementary representations (p.9)*
- *Intracranial recordings suggest that, in contrast to fast γ , slow γ does not seem to be triggered in a strictly item-specific manner, and so slow γ power likely does not carry information via amplitude but is rather responsible for temporally organizing other signals (p.10)*
- $\delta - \theta - \gamma^L - \gamma^H$

Structure

- Merge é uma operação binária que atua em um espaço de trabalho manipulando unidades sintáticas de forma estruturada
- Merge conecta duas unidades sintáticas criando uma relação estrutural entre esses dois itens
- *Labeling*: objeto sintático que domina a estrutura binária. A escolha do item a ser rotulado se relaciona com proeminência estrutural e facilidade na sondagem
- $MERGE (P, Q, WS) = WS' = \{\{P, Q\}, X1, \dots, Xn\}$ (p.11)

Syntactic signatures

- *The most basic, and directly testable assumption of the S component of ROSE will be that the processing correlates of MERGE and labeling can be detected after posterior temporal δ phase-locks to θ either in neighboring temporal sites or inferior frontal sites, depending on the category of structure being composed. These low frequency interactions may take place in portions of posterior temporal cortex that are separate from, or only partially overlapping with, those portions of pSTS that are implicated in O via high γ sensitivity to basic compositional operations. (p.11)*
- O fascículo arqueado dorsal que conecta o lobo temporal posterior ao lobo frontal inferior parece ser mais sensível à codificação sintática, enquanto que partes ventrais nessa região, juntamente do lobo temporal anterior, parecem ser mais sensíveis à codificação conceitual.

Syntactic signatures

- *The $\delta - \theta$ frontotemporal interactions in S are assumed to influence medial temporal and frontal $\theta - \gamma$ coupling pertaining to representational bundling. (p.12)*
- Baixas frequências (especialmente $\delta - \theta$) parecem estar fortemente vinculado a categorias sintáticas superordenadas e inferências estruturais
- *To reiterate a major implication of ROSE, one of the testable predictions from the present model is that we will not find reliable signatures of syntax at lower levels of neural complexity, such as signals emerging from single-unit or even ensemble activity. Instead, structural inferences are hypothesized to be unique to population-level, global, slower dynamics (p.13)*

Mapping O to S

- Múltiplos agrupamentos de conjuntos unitários de R, via atividade γ , são coordenados por frequências mais baixas (organização estrutural via $\delta - \theta$ coupling)
- *ROSE places $\delta - \theta$ interactions as part of a more general syntactic, categorization process, not unique to 'word'-level elements, applying also to sets of lexical objects to form phrases [...] some low frequency interactions specifically in the δ and θ ranges form the basis of inferring S. (p.14)*
- Frequências mais altas se relacionam com a ativação e agrupamento de representações (R – O), mais local
- Frequências mais baixas se relacionam com a composição estrutural, integração de informação (O – S), mais global

Mapping S to E

- Oscilações viajantes servem como transferidoras de informação através do córtex
- Não específicas para a linguagem, mas sim como parte de um mecanismo mais de geral de alta ordem
- “Criam” um espaço de trabalho (E) que mantém ativas as representações estruturais de S
- *[...] S codes specifically for recursive structure generation, and traveling waves migrate these representations over to relevant workspaces in E. [...] The different types of macro-vs. micro-scale traveling waves may form their own internal hierarchy of sensitivity to distinct structures or higher-order relations in language processing, e.g., global situation model maintenance vs. local phrase structure coordination. (p.16)*
- O dinamismo que essas oscilações viajantes apresentam no córtex humano parece estar relacionado ao formato mais globular do cérebro humano quando comparado com outros primatas

Enconding

- É necessário a existência de uma espaço de trabalho que torne possível o processamento sintático (R-O-S): E
- $\theta - \gamma$: memória de trabalho lexical (R-O)
- $\delta - \theta$: memória de trabalho estrutural/hierárquica (O-S)
- O mecanismo de codificação se dá pela interação entre esses dois códigos
- Ondas viajantes seriam responsáveis por manter diferentes áreas corticais ativas e sincronizadas
- Essas ondas seriam, portanto, o mecanismo integrador desses dois tipos de código, interagindo com outros tipos de oscilação que se relacionariam com demandas preditivas e atenção

ROSE

