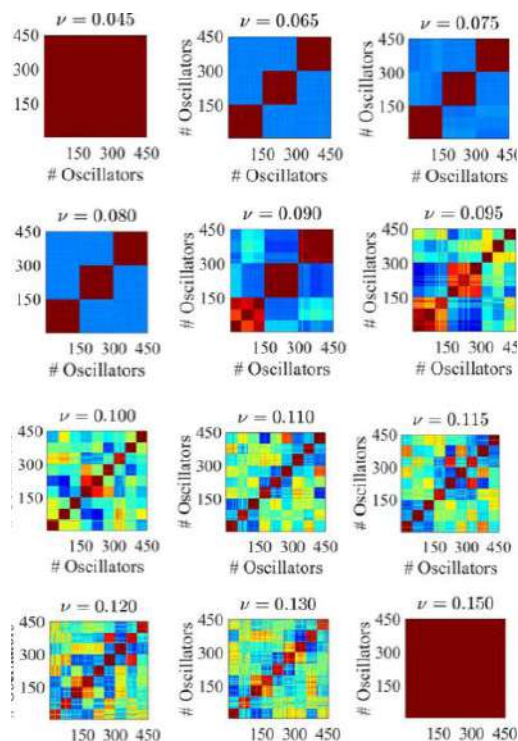


Hidden Modularity Through Delay Dynamics

In the brain, modularity isn't always written into the connectivity map—it can emerge from the timing of interactions. In this study, we show how diverse interaction delays between neural populations can reveal functional modularity even when the structural connectivity is uniform or non-modular. Rather than requiring specialized wiring, the temporal spread of delays creates windows of selective coherence, allowing subsets of oscillators to synchronize while others remain desynchronized. This highlights how frequency-dependent communication through delay diversity can dynamically segment the brain into functionally independent units. The result is a more flexible, richer dynamical repertoire, essential for complex behaviors, attention switching, and multiplexed processing.

Our analysis reveals that introducing heterogeneity into the distribution of delays between coupled oscillatory nodes causes the network to self-organize into distinct frequency bands, each with its own pattern of coherence and segregation. Interestingly, this modularity in dynamics arises without any explicit modular structure in the network's topology. We find that when the mean delay aligns with the intrinsic oscillation period, large-scale coherence emerges. As the frequency shifts away from this resonance, distinct frequency-specific modular clusters appear and disappear. The results show that interaction delays do more than slow down communication—they shape the very structure of functional networks, offering a mechanism for the brain to switch, sculpt, and expand its computational repertoire using time alone.



Modularidad Oculta a Través de la Dinámica de Retrasos

En el cerebro, la modularidad no siempre está inscrita en el mapa de conectividad: puede emerger del propio tiempo de las interacciones. En este estudio mostramos cómo la diversidad de retrasos en la interacción entre poblaciones neuronales puede revelar modularidad funcional incluso cuando la conectividad estructural es uniforme o no modular. En lugar de requerir un cableado especializado, la dispersión temporal de los retrasos crea ventanas de coherencia selectiva, permitiendo que ciertos subconjuntos de osciladores se sincronicen mientras otros permanecen desincronizados. Esto pone de relieve cómo la comunicación dependiente de la frecuencia, a través de la diversidad de retrasos, puede segmentar dinámicamente el cerebro en unidades funcionalmente independientes. El resultado es un repertorio dinámico más flexible y rico, esencial para conductas complejas, cambios de atención y procesamiento multiplexado.

Nuestro análisis revela que introducir heterogeneidad en la distribución de los retrasos entre nodos oscilatorios acoplados provoca que la red se autoorganice en bandas de frecuencia distintas, cada una con su propio patrón de coherencia y segregación. De forma interesante, esta modularidad en la dinámica surge sin necesidad de una estructura modular explícita en la topología de la red. Encontramos que, cuando el retraso medio se alinea con el periodo intrínseco de oscilación, emerge una coherencia a gran escala. A medida que la frecuencia se desplaza de esta resonancia, aparecen y desaparecen clústeres modulares específicos de frecuencia.

Los resultados muestran que los retrasos de interacción hacen más que ralentizar la comunicación: moldean la propia estructura de las redes funcionales, ofreciendo un mecanismo para que el cerebro cambie, esculpa y expanda su repertorio computacional únicamente mediante el tiempo.

