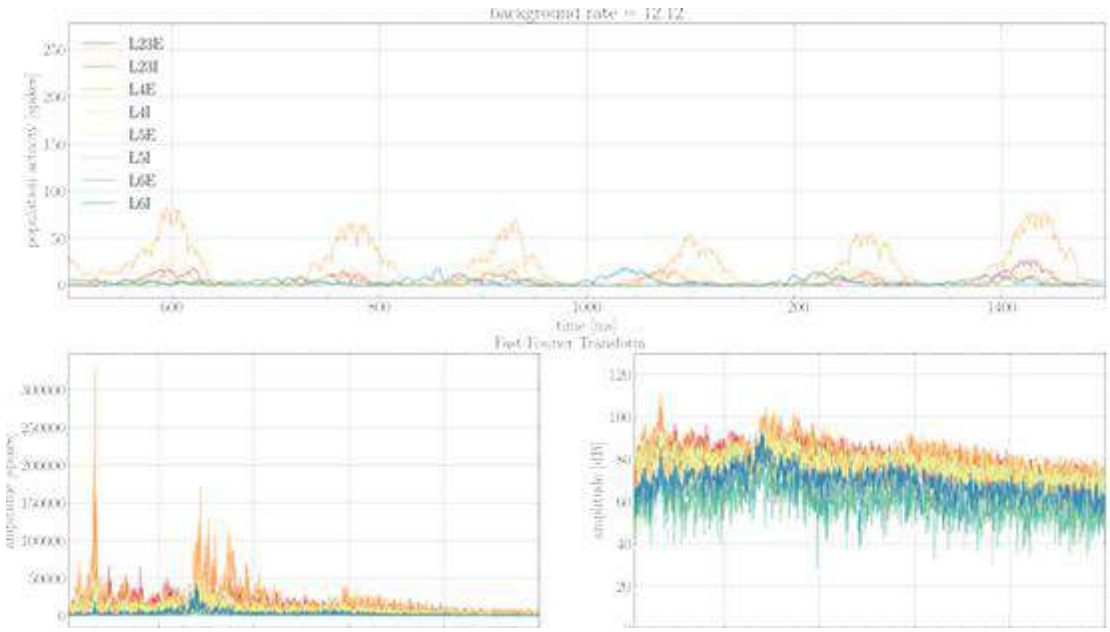
Gamma Rides the Theta Wave: Intrinsic Cross-Frequency Dynamics in a Cortical Column

Modeling cortical columns using biologically grounded microcircuits, such as the Potjans & Diesmann framework, allows us to investigate how large-scale brain dynamics emerge from local connectivity and spiking activity. These models provide insight into neural phenomena like oscillations, synchrony, and population-level modulation, which are crucial for understanding attention, memory, and cognition.

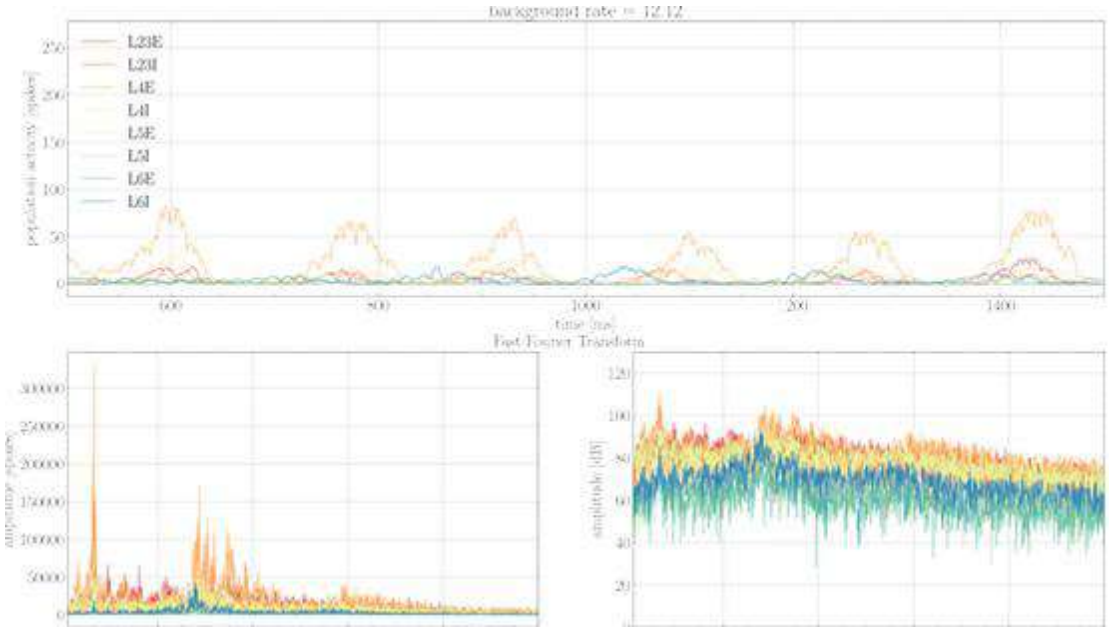
A key contribution of this work is the observation that slow oscillatory modulation—typically associated with adaptation or feedback loops—can emerge purely from the dynamics of fast interactions. Specifically, a slow theta/alpha rhythm arises as an envelope of intermittent gamma bursts, without requiring any intrinsic slow processes or plasticity mechanisms.

We show that increasing external input to the cortical column leads to the emergence of gamma oscillations modulated by a slow rhythm, resembling theta or alpha. This modulation arises intrinsically, without adaptation or thalamic feedback. Both synchrony and irregularity increase with input rate, and spectral analysis reveals the gamma rhythm becomes stronger and more irregular, while the slow rhythm remains relatively stable. This demonstrates that slow timescales can emerge from the population-level dynamics of fast spiking neurons alone.



Onda Gamma sobre la onda Theta: Dinámicas de acoplamiento de frecuencias en una columna cortical

Modelar columnas corticales mediante microcircuitos con fundamento biológico, como el marco de Potjans & Diesmann, nos permite investigar cómo las dinámicas cerebrales a gran escala emergen de la conectividad local y la actividad de disparo neuronal. Estos modelos aportan información sobre fenómenos neuronales como las oscilaciones, la sincronía y la modulación a nivel poblacional, que son cruciales para comprender la atención, la memoria y la cognición.

Una contribución clave de este trabajo es la observación de que la modulación oscilatoria lenta —típicamente asociada con la adaptación o los bucles de retroalimentación— puede emerger únicamente de la dinámica de interacciones rápidas. Específicamente, un ritmo lento theta/alfa surge como una envolvente de ráfagas gamma intermitentes, sin necesidad de procesos intrínsecos lentos ni mecanismos de plasticidad.

Mostramos que un aumento en la entrada externa a la columna cortical conduce a la aparición de oscilaciones gamma moduladas por un ritmo lento, semejante a theta o alfa. Esta modulación surge de manera intrínseca, sin adaptación ni retroalimentación talámica. Tanto la sincronía como la irregularidad aumentan con la tasa de entrada, y el análisis espectral revela que el ritmo gamma se vuelve más fuerte e irregular, mientras que el ritmo lento permanece relativamente estable. Esto demuestra que las escalas temporales lentas pueden emerger únicamente de la dinámica poblacional de neuronas de disparo rápido.