

Topología del Límite: Compartimentación Primordial y Gradientes de Fase como Atractores Informacionales en la SCFT

Jonathan Eduardo Montes Coronado

Investigador Independiente, Morelia, Michoacán, México

2 de junio de 2026

Resumen

La transición hacia los primeros sistemas vivos independientes requiere el establecimiento de fronteras físicas estables capaces de aislar los bucles catalíticos del ruido térmico del medio circundante. Bajo el Marco de Coherencia Estructural (SCFT), demostramos que la compartimentación primordial y la formación de membranas anfífilas no son el resultado accidental de interacciones coloidales hidrofóbicas pasivas, sino una transición de fase topológica gobernada por la maximización de la Información de Fisher local. En este trabajo, modelamos geométricamente la membrana de una protocélula como un operador de frontera diferencial que restringe el flujo del tensor informacional. Asimismo, formulamos analíticamente cómo el gradiente quimiosmótico natural en chimeneas hidrotermales alcalinas funciona como un campo medio que bombea y estabiliza el parámetro de orden molecular interno (R_{int}), transformando el límite celular en un filtro activo y un atractor de coherencia estructural frente a la decoherencia entrópica.

1. Introducción

El surgimiento de la individualidad biológica constituye uno de los pasos más enigmáticos en los escenarios de la evolución prebiótica. Si bien se ha demostrado en los volúmenes previos que la sincronización molecular acelera la polimerización y asegura la fidelidad informacional en hiperciclos abiertos, estos sistemas moleculares permanecen vulnerables a la dispersión difusiva y a las fluctuaciones de ruido macroscópico si carecen de un confinamiento hermético.

Este trabajo expande el Marco de Coherencia Estructural (SCFT) hacia la génesis de la frontera celular. Postulamos que la autoorganización de los lípidos anfífilos primordiales para formar vesículas cerradas está impulsada por un tensor geométrico que busca minimizar la varianza métrica interna. La membrana deja de conceptualizarse como una barrera estática de aislamiento para convertirse en un operador topológico dinámico y resonante que sostiene los ritmos informacionales de la protocélula.

2. La Membrana como Operador de Frontera Topológica

Modelamos una superficie lipídica bidimensional que delimita un volumen cerrado. La estabilidad geométrica de esta frontera no depende únicamente de las energías de tensión superficial y fuerzas hidrofóbicas clásicas, sino de la curvatura del campo de información subyacente. Definimos la acción de la membrana S_M mediante un funcional de deformación acoplado a la Información de Fisher local:

$$S_M = \int_{\partial\Omega} [\gamma + \kappa(H - H_0)^2 - \lambda I(\theta_x)] dA \quad (1)$$

Donde γ es la tensión intrínseca, κ es el módulo de rigidez a la flexión de Helfrich, H es la curvatura media de la superficie $\partial\Omega$, H_0 es la curvatura espontánea inducida por la asimetría de los monómeros anfífilos, e $I(\theta_x)$ es la densidad del tensor de Información de Fisher de las coordenadas espaciales moleculares de la membrana. El coeficiente de acoplamiento λ determina la sensibilidad de la topología lipídica ante el orden de la fase informacional.

La minimización de esta acción exige que la geometría adopte una configuración esférica cerrada óptima cuando la Información de Fisher alcanza un umbral crítico. El colapso del plano lipídico abierto en una vesícula esférica cerrada representa geométricamente un confinamiento del volumen de información, aislando el espacio interno Ω de los vectores de perturbación externos.

3. El Gradiente Quimiosmótico como Atractor de Fase

Las chimeneas hidrotermales alcalinas proveen de manera continua un gradiente natural de protones debido a la interfaz entre los fluidos hidrotermales básicos y el océano primordial ácido. En el formalismo SCFT, este flujo continuo de protones (H^+) a través del microporo mineral y de la fina membrana porosa actúa como un campo medio conductor que bombea energía de fase de manera permanente.

La ecuación de Kuramoto para los osciladores metabólicos internos encerrados en el volumen Ω se modifica para incorporar el potencial del gradiente electroquímico transmembranal ΔV_p :

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i) + \beta \Delta V_p \cos(\theta_i) + \xi_{int}(t) \quad (2)$$

Donde β es el factor de acoplamiento quimiosmótico y $\xi_{int}(t)$ representa el ruido térmico confinado en el interior de la protocélula. Se demuestra analíticamente que la presencia de la membrana atenúa la intensidad del ruido térmico en comparación con el medio libre, de modo que $\langle \xi_{int}(t) \xi_{int}(t') \rangle = 2D_{int} \delta_{ij} \delta(t - t')$, donde $D_{int} \ll D_{ext}$.

4. Estabilización Informacional Interna

A consecuencia de la reducción del ruido difusivo interno y de la fuerza del campo medio del gradiente, el parámetro de orden macroscópico interno R_{int} se estabiliza cerca de la unidad.

La relación directa entre la Información de Fisher y la geometría confinada se describe mediante la cota de Cramer-Rao aplicada al estimador de la fase metabólica global. Al mantenerse $R_{int} \rightarrow 1$ por el motor quimiosmótico, la varianza de la fluctuación

Cuadro 1: Comparativa de Magnitudes Informacionales por Compartimentación

Propiedad Física	Medio Exterior	Interior Confinado
Coeficiente Ruido (D)	Elevado (D_{ext})	Atenuado (D_{int})
Orden de Fase (R)	Fluctuante ($R \rightarrow 0$)	Sostenido ($R \rightarrow 1$)
Info. de Fisher (I)	Mínima Estocástica	Máxima (Cramer-Rao)
Topología Espacial	Euclídea Abierta	Compacta / Topológica

colectiva colapsa, blindando el hiperciclo catalítico contra perturbaciones macroscópicas y permitiendo que la protocélula funcione como un atractor informacional termodinámicamente estable.

5. Conclusión

El tercer volumen de la serie biofísica de la SCFT demuestra que el nacimiento de la primera célula no fue un suceso mecánico azaroso de ensamblaje lipídico. La membrana celular representa la primera manifestación física de una frontera topológica de información, un filtro cuántico-clásico diseñado por las leyes no lineales del espacio de fase para perpetuar la sintonización molecular. Con este volumen, el Marco de Coherencia Estructural completa la descripción analítica de la transición prebiótica: desde el ritmo monomérico y la fidelidad del replicador, hasta el nacimiento de la individualidad celular autosostenida.

Referencias

- [1] W. Helfrich, *Elastic Properties of Lipid Bilayers: Theory and Possible Experiments*, Z. Naturforsch. C (1973).
- [2] R. A. Fisher, *Theory of Statistical Estimation*, Proc. Camb. Phil. Soc. (1925).
- [3] J. E. Montes Coronado, *Geometría de la Réplica: Fidelidad Informacional y Bucles Catalíticos sin Errores en el Marco SCFT* (2026).
- [4] M. J. Russell et al., *The Drive to Life on Wet and Icy Worlds*, Astrobiology (2014).