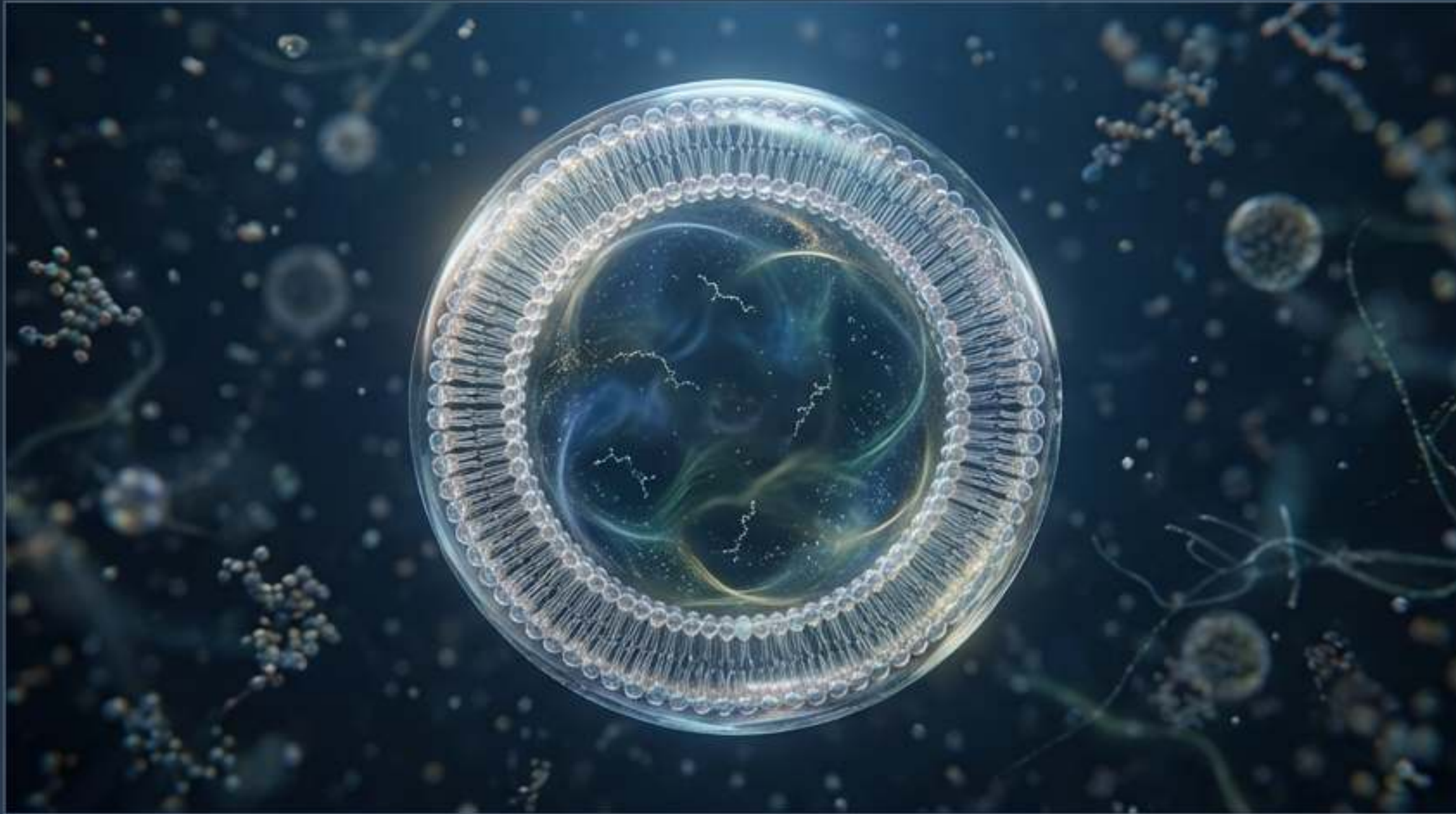


CAPA 4: De la Química a la Célula

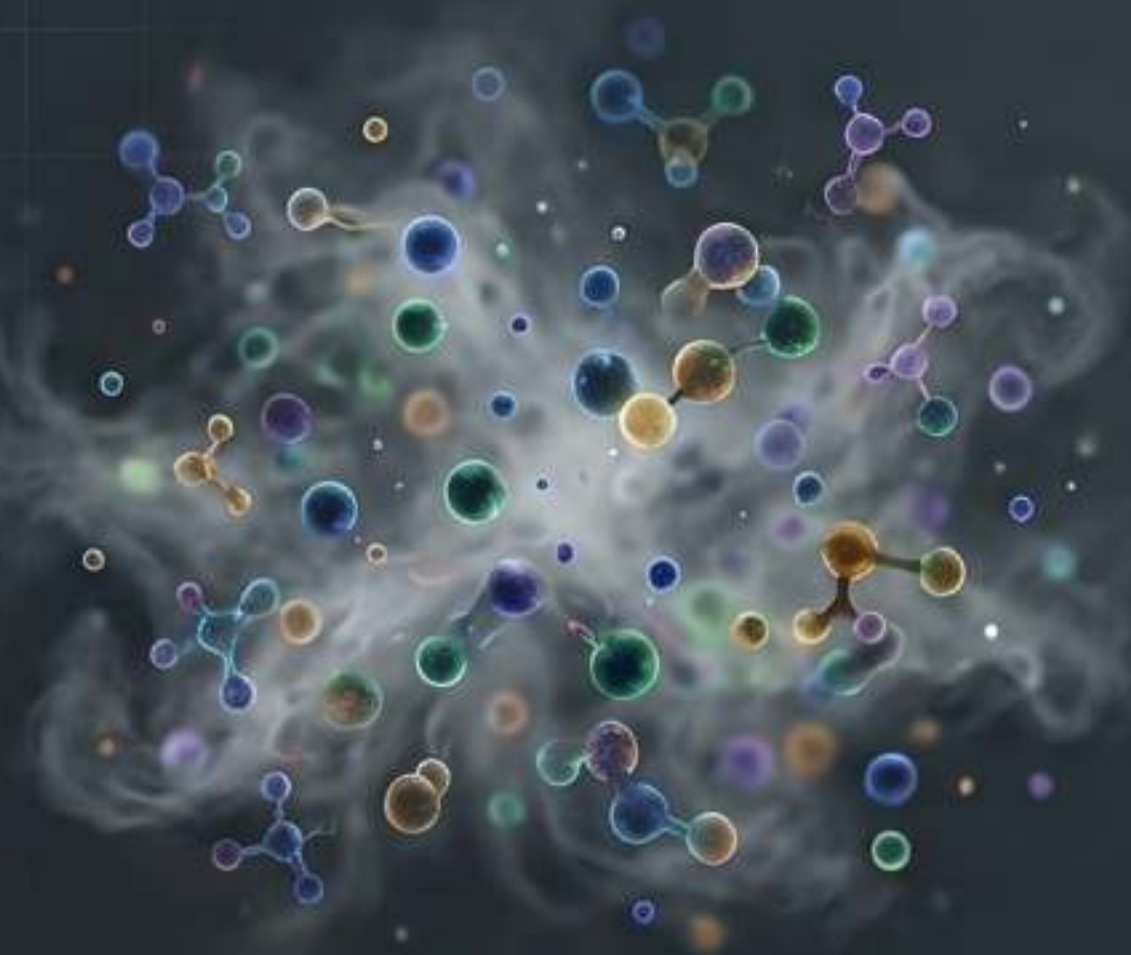
El nacimiento de la unidad viva y la autonomía biológica.



Una exploración de la transición de estado fundamental: de redes químicas difusas a entidades discretas, autocontenidas y capaces de mantener su identidad frente a la entropía.

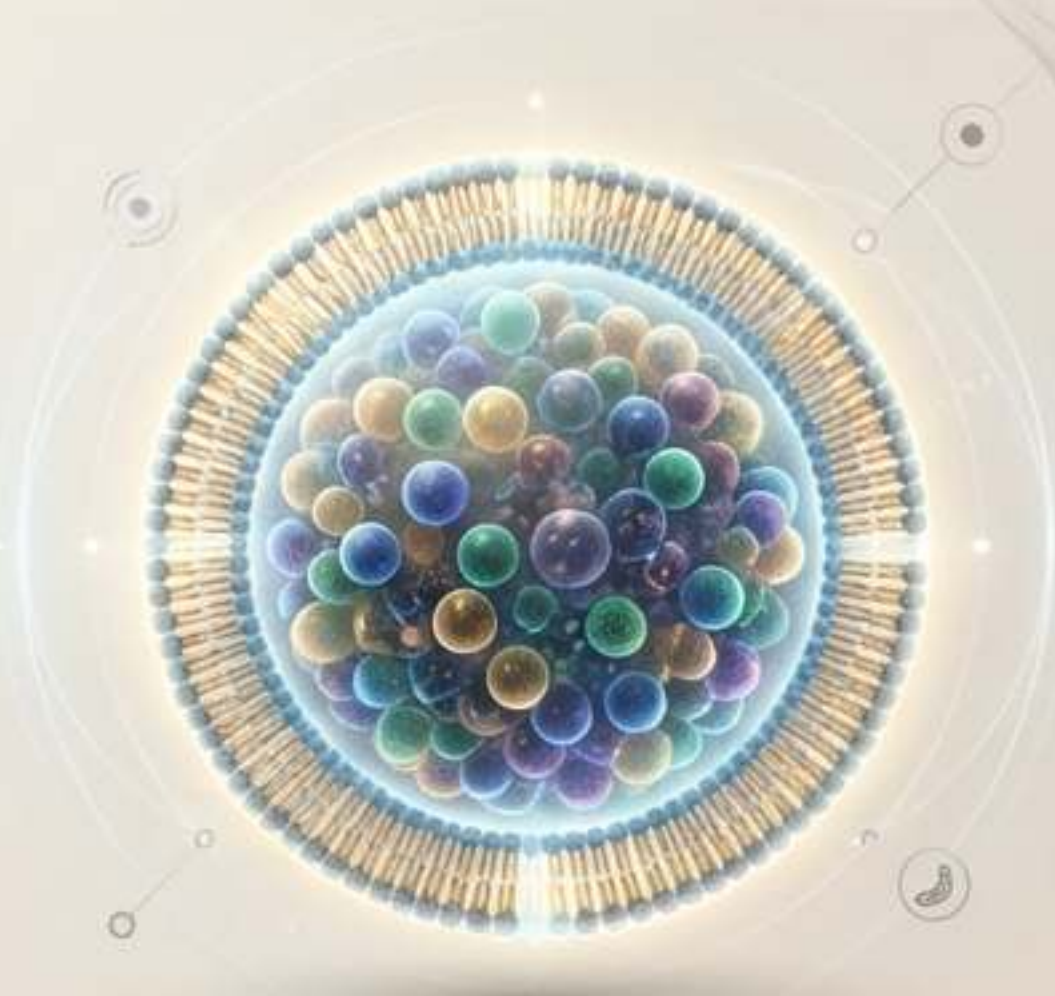


El Problema Fundamental: De la Difusión a la Identidad



Estado Inicial: Redes químicas en solución.

- Alta entropía
- Sin límites definidos

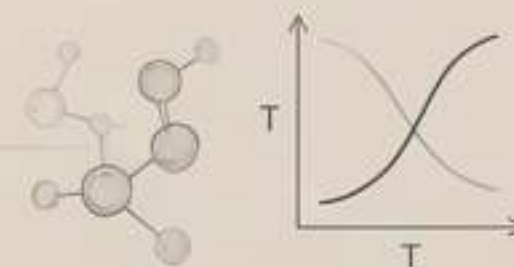


Estado Final: Entidades autocontenidas.

- Identidad discreta
- Autorreproductivas

Pregunta Clave

Pregunta Clave: ¿Cómo pasan los sistemas difusos a formar entidades discretas que mantienen una identidad frente al entorno?
La paradoja de mantener una estructura ordenada dentro de un universo que tiende al desorden termodinámico.

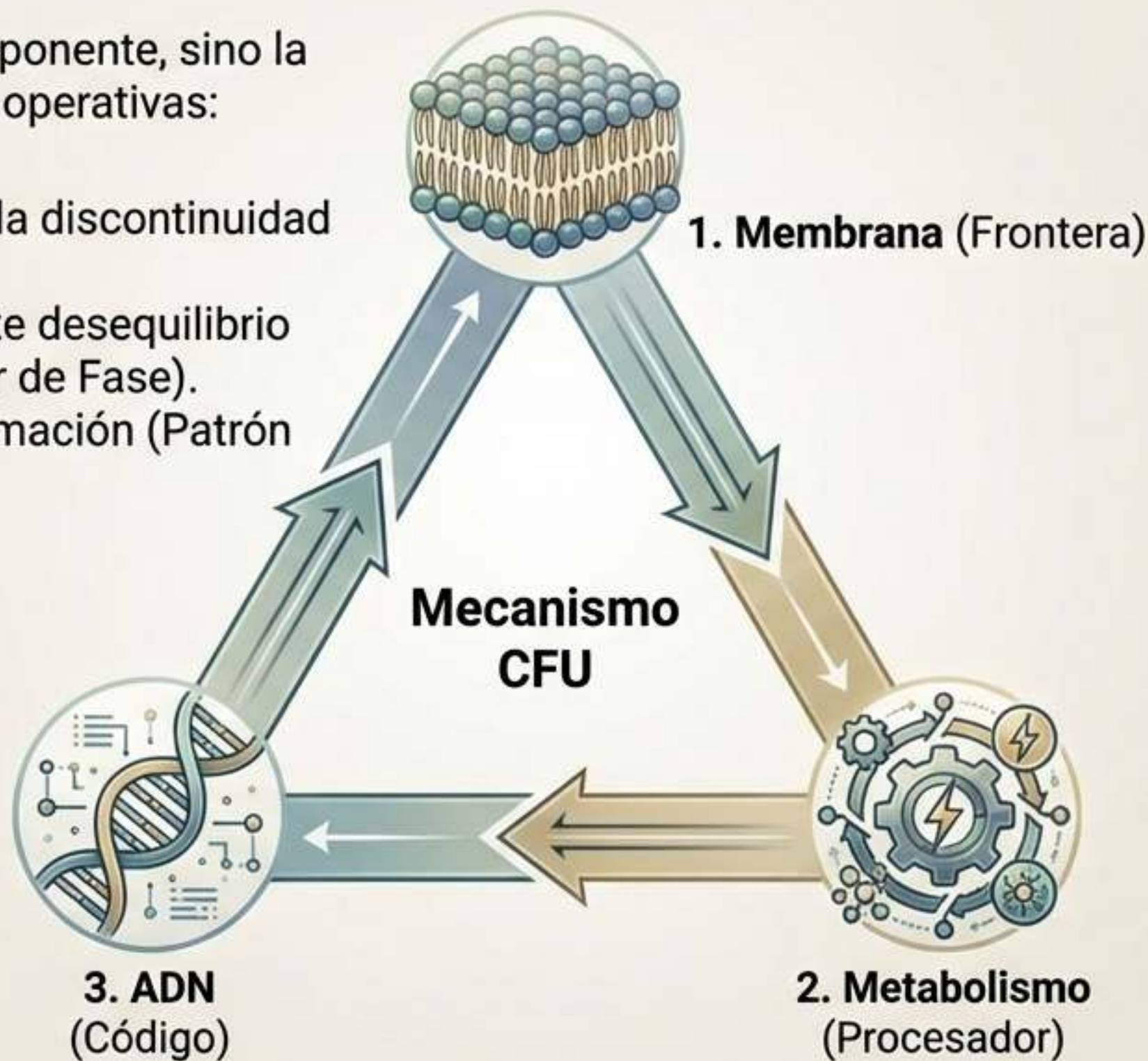




La Tríada de la Vida: El Mecanismo CFU

La vida no es un solo componente, sino la integración de tres 'fases' operativas:

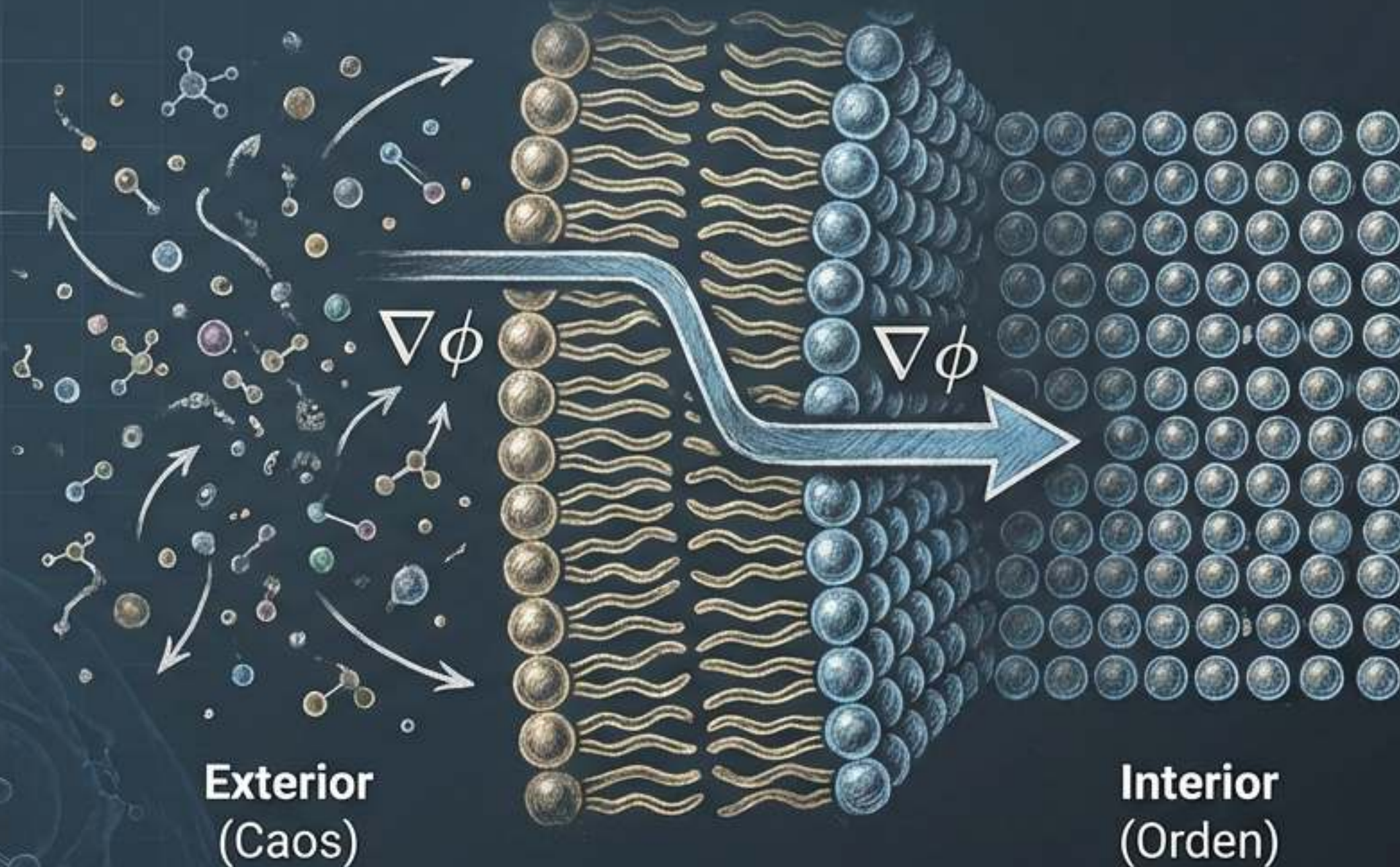
1. Membrana: Establece la discontinuidad (Frontera de Fase).
2. Metabolismo: Convierte desequilibrio en trabajo (Procesador de Fase).
3. ADN: Preserva la información (Patrón de Fase Congelado).



Takeaway:
Compartimentalización +
Flujo de Información Dirigido.

Pilar 1: La Membrana como Frontera de Fase

$$Fase_{interna}: \varphi_{int}(x, t) \neq \varphi_{ext}(x, t)$$

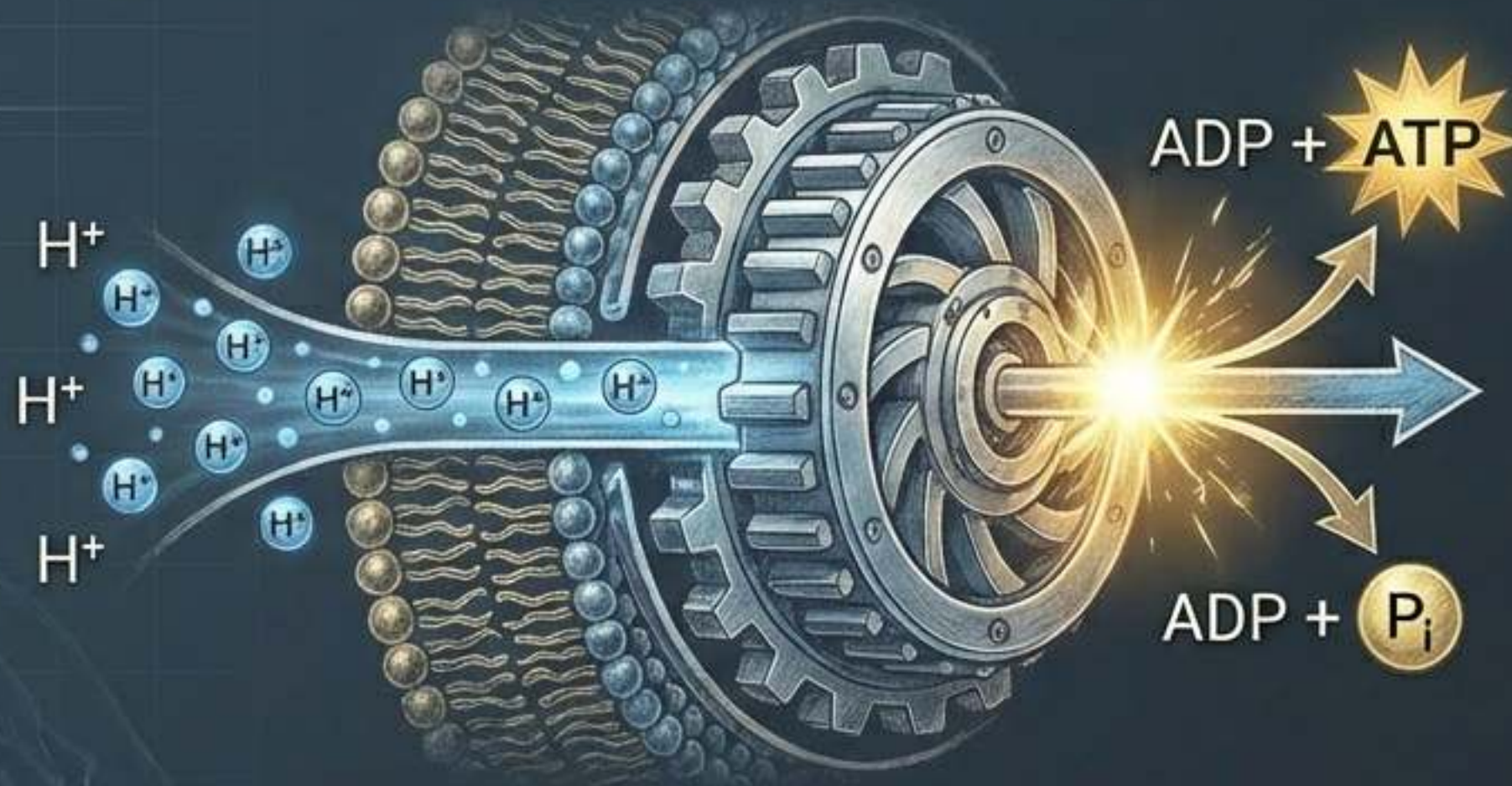


Una bicapa lipídica no es solo un contenedor; establece una **discontinuidad termodinámica**.

- **Gradiente ($\nabla \phi$):** La separación permite mantener una organización interna distinta al caos externo.
- **Selectividad:** Actúa como un filtro de Maxwell, controlando qué entra y qué sale para mantener el desequilibrio necesario.

Pilar 2: Metabolismo como Procesador de Fase

Input: Gradientes de fase (químicos/electroquímicos) → **Operation:** Reacciones bioquímicas acopladas → **Output:** Trabajo útil (ATP)



El "Problema de Morowitz" (cómo emergen gradientes estables) se resuelve mediante el acoplamiento de reacciones: una bomba de protones crea un ΔpH , y ese ΔpH impulsa la síntesis de ATP.

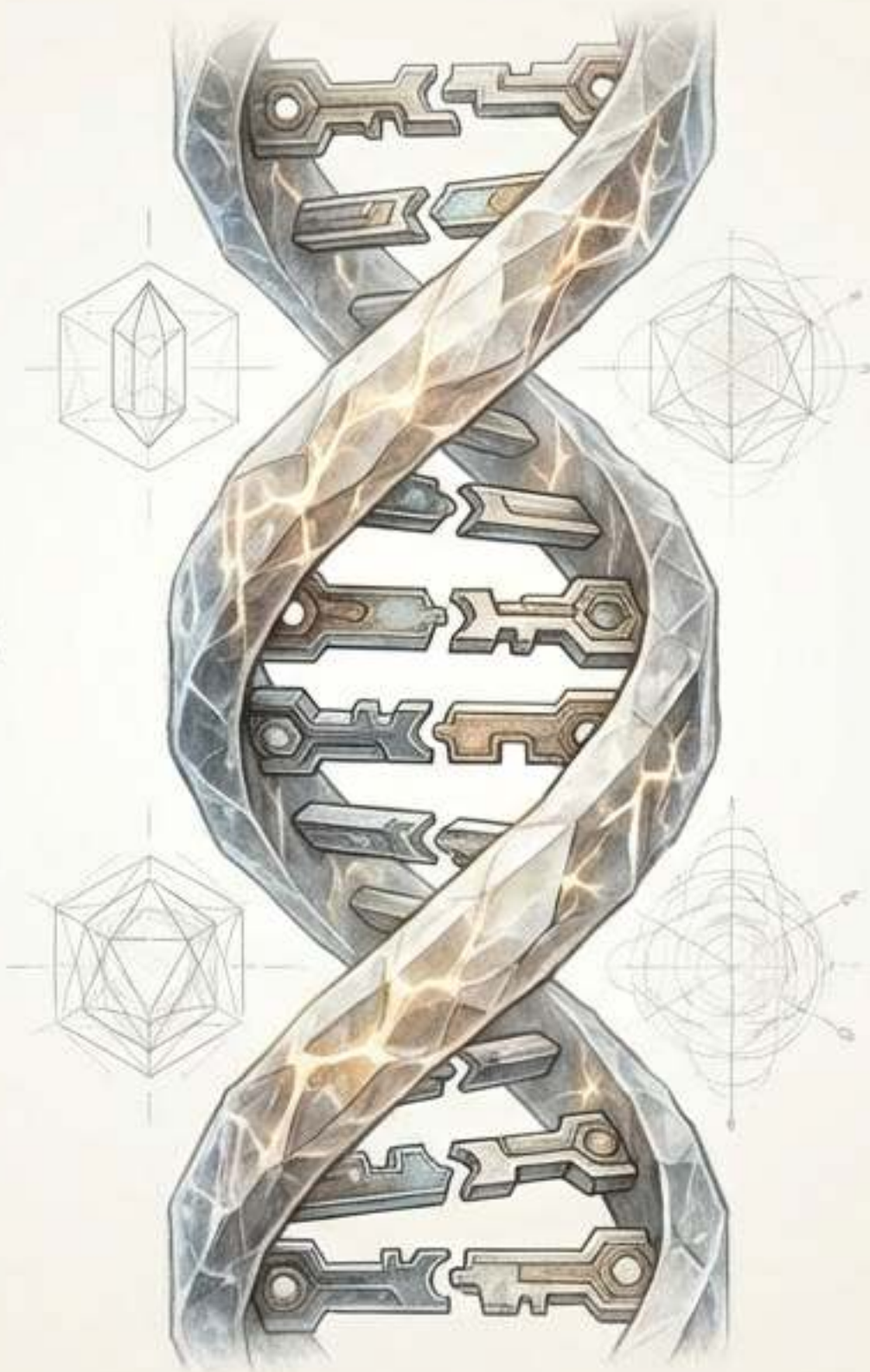


Pilar 3: ADN como Patrón de Fase Congelado

Concepto: Un cristal aperiódico (Schrödinger) que sirve como memoria estable.

Mecanismo:

- **Secuencia:** "...A-T-C-G..." representa un patrón de enlaces de hidrógeno específico.
- **Fidelidad:** La estructura permite que el patrón sea copiado con alta precisión, asegurando que la "identidad de fase" sobreviva al tiempo.

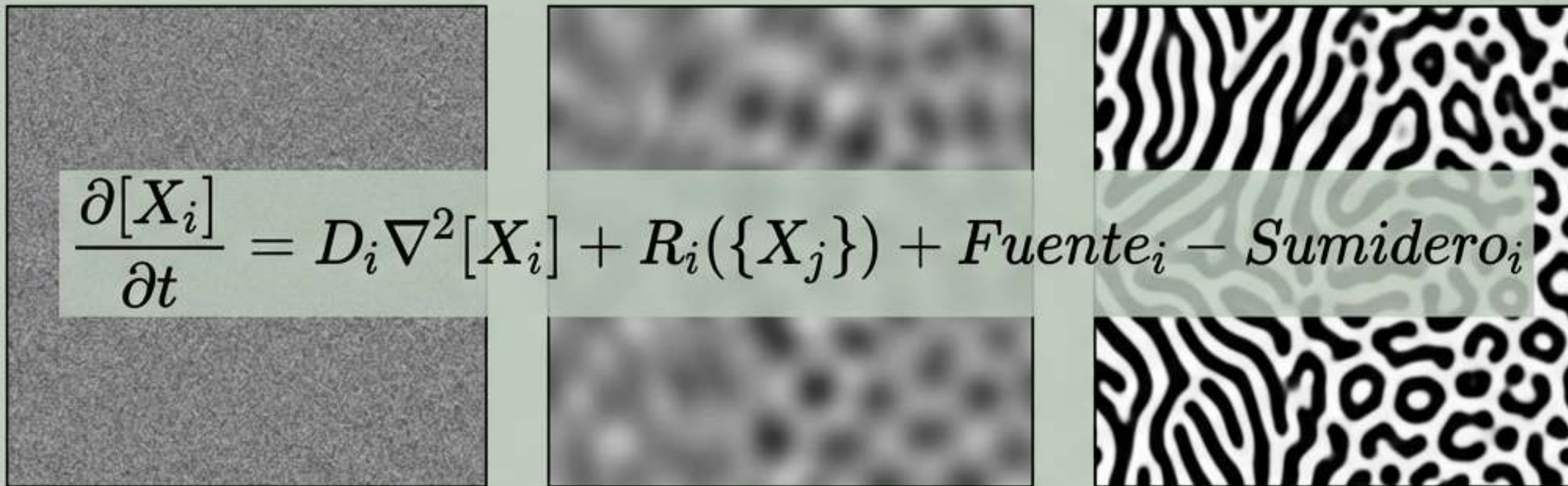


Rol: Es el código fuente que permite reconstruir el sistema (Autopoiesis).



Modelado Matemático: Reacción y Difusión

$$\frac{\partial[X_i]}{\partial t} = D_i \nabla^2[X_i] + R_i(\{X_j\}) + Fuente_i - Sumidero_i$$



Turing: Cómo surgen estructuras espaciales estables en un medio fluido mediante la competencia entre reacción (local) y difusión (global).

Condición de Frontera: $Flujo_{neto} = P \cdot ([X]_{ext} - [X]_{int}) + Transportadores$

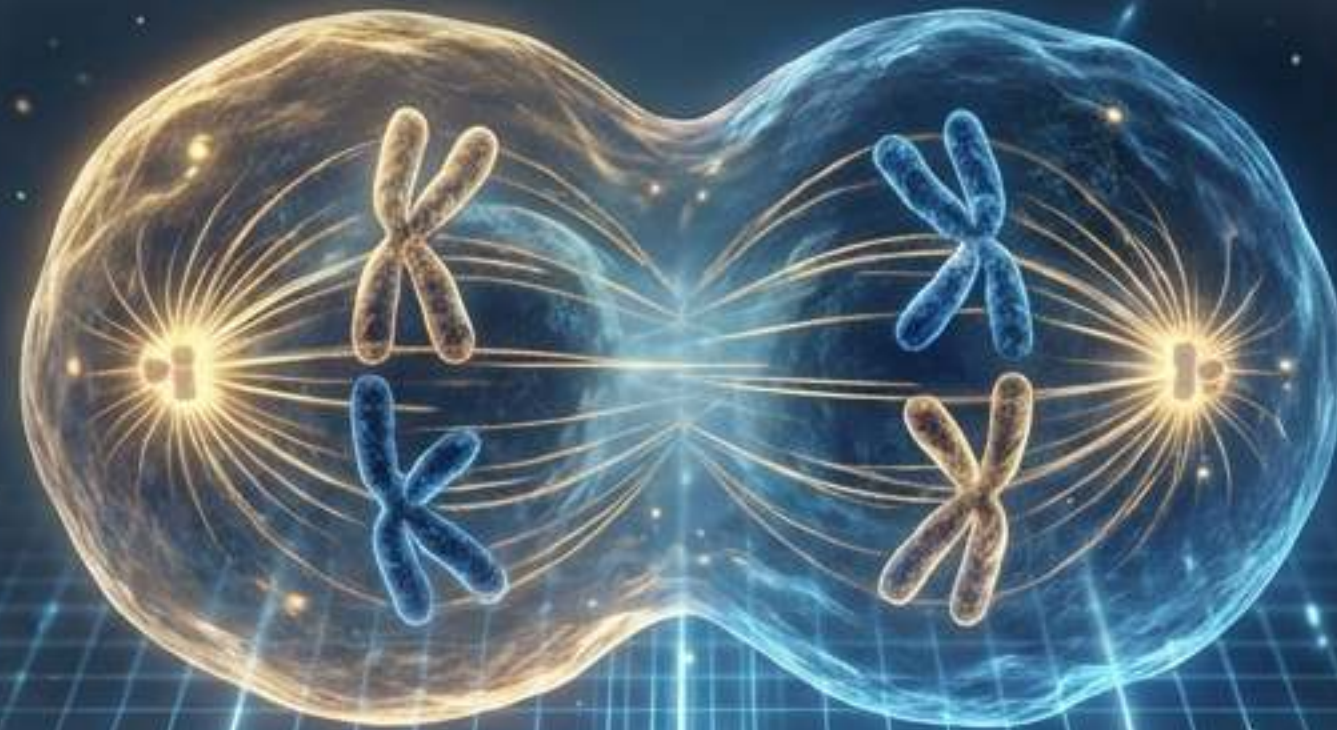
Conclusión: La forma biológica es una solución matemática a ecuaciones de campo.



La Célula como Autómata (Von Neumann)

Analogía Funcional:

- Celdas = Moléculas o complejos moleculares.
- Estados (s) = Conformaciones químicas ($s \in \{0, 1, \dots, k\}$).
- Reglas (f) = Leyes de la química y termodinámica ($s_i(t+1) = f(\text{vecindario})$).



Von Neumann demostró teóricamente que un autómata puede contener las instrucciones para copiar su propia configuración. La célula es la implementación física de este teorema.

Autopoiesis: La Definición Formal (Maturana & Varela)



Sistema autopoietico
 $= (V, R, A, \partial)$

- V : Componentes.
- R : Relaciones de producción ($V \rightarrow V$).
- A : Estructura actual.
- ∂ : Frontera (producida por el sistema).

Principio Core:

Clausura Operacional.
El producto del sistema es el sistema mismo.

Condición Clave: Para todo componente v , existe una secuencia de reacciones que lo produce.

Isomorfismo: La Máquina de Turing Química

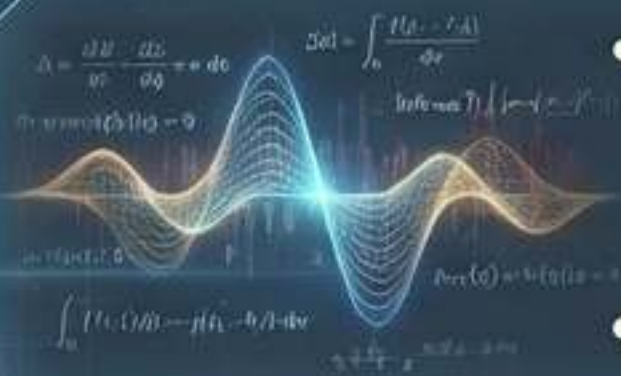


Célula
Biológica



Máquina de Turing Química

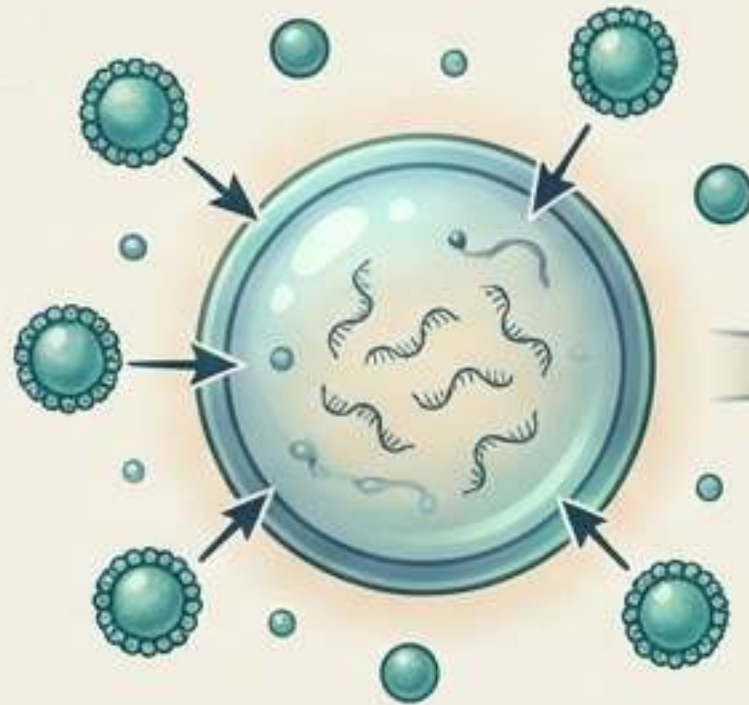
Hardware	Proteínas, membranas	Cabezal de lectura
Software	Redes reguladoras, ADN	Cinta de instrucciones
Estados	Conformaciones enzimáticas	Tabla de Estados



- **Deep Math:** Comparación entre la Ecuación de Reacción-Difusión y la Ecuación de Schrödinger no lineal. Ambas describen campos que interactúan consigo mismos formando "solitones" (estructuras localizadas).
- **Concepto:** La célula es un solitón químico que se automantiene.

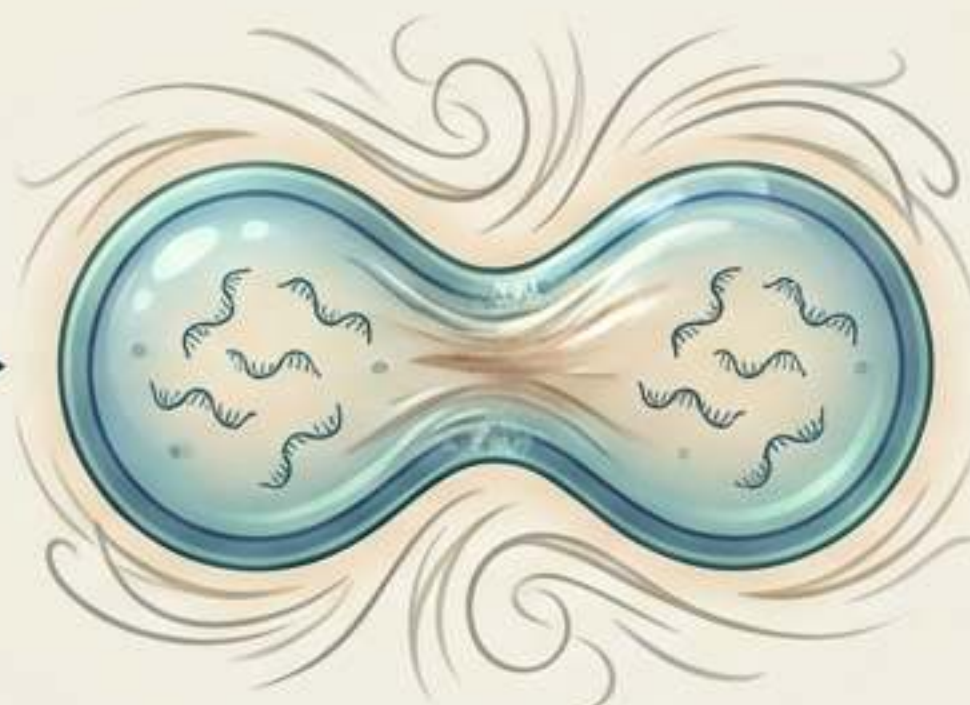
Del Modelo a la Realidad: La Protocélula

Evidencia Experimental (Szostak, 2001)



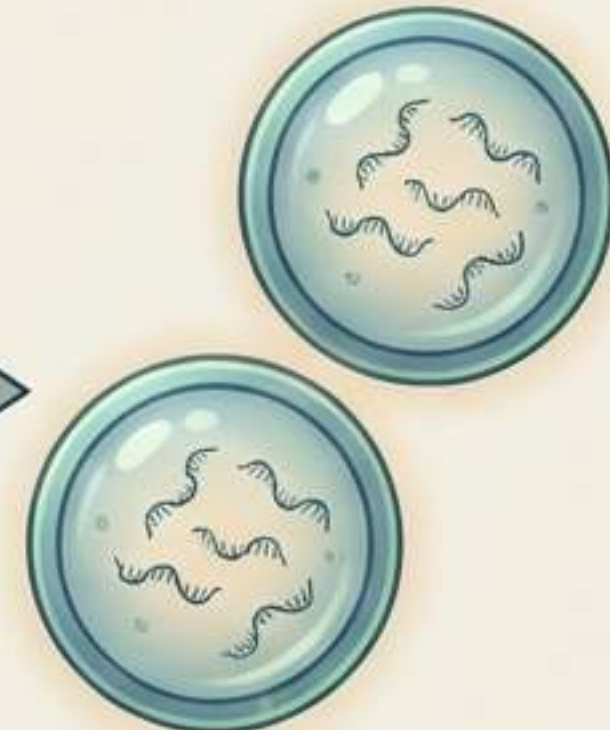
1. Crecimiento

1. Crecimiento: Incorporación espontánea de ácidos grasos del medio.



2. Agitación

2. División: División física por agitación (sin maquinaria proteica).



3. División

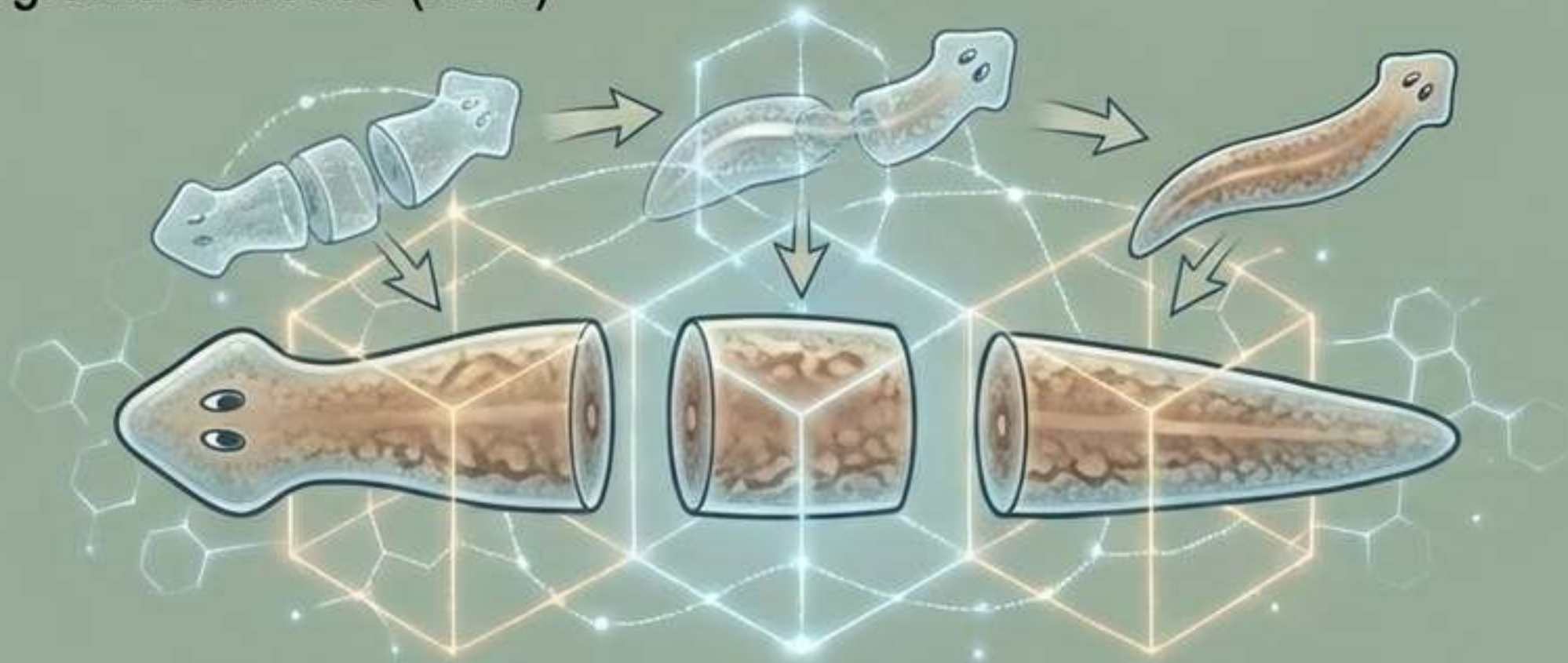
3. Replicación: El ARN encapsulado puede replicarse.

La bicapa establece $\Delta\varphi = \varphi_{\text{ext}} - \varphi_{\text{int}} > 0$.
Los receptores primitivos detectan gradientes de fase externos.

La Conexión Holográfica: El Todo en la Parte

Concepto: La información total de la célula está distribuida en su volumen (citoesqueleto, gradientes, estados metabólicos), no solo en el ADN.

- Holograma Estructural (Citoesqueleto)
- Holograma Metabólico (Redes de ATP/NADH)
- Holograma Genético (ADN)



Principio: “Entrelazamiento de fase”. Cada molécula contiene información sobre el estado del sistema a través de sus interacciones.

El Tiempo Biológico Emergente

La célula crea su propia escala temporal.



La Paradoja de *E. coli*:

- Tiempo de división: ~20 min
- Tiempo de replicación ADN: ~40 min

Solución: Replicación multifurca (inicia una nueva ronda antes de terminar la anterior). La célula manipula su propia temporalidad interna.

La Transición Crítica: De Química a Vida

Propiedades Emergentes

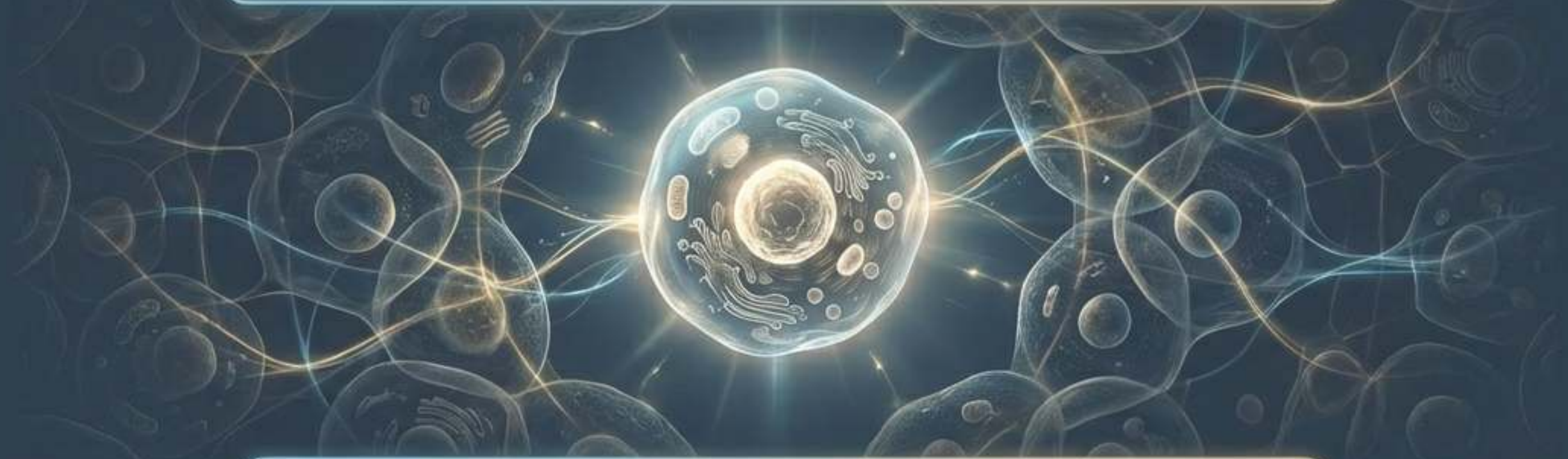


Teoría de Sistemas Autónomos (Varela):

Un sistema operacionalmente cerrado (las operaciones producen las operaciones) pero estructuralmente acoplado (intercambia energía con el entorno).

El Logro de la Autonomía

Hemos pasado de redes difusas a sistemas celulares discretos.
El “milagro” de la unidad funcional ha sido resuelto mediante
Frontera, Procesamiento y Memoria de fase.



The Next Challenge

Las células individuales ahora enfrentan un nuevo límite.
¿Cómo sincronizarse para formar entidades de orden superior?

Preparación para CAPA 5: De la Célula al Organismo Pluricelular.