

# Conciencia Transformativa (CT) 9.0: Un Marco Resonante y Construible para la Emergencia de la Conciencia

Angel Imaz  
Investigador Independiente  
Contacto: angel@libre.earth

24 de febrero de 2025

## Abstract

La Conciencia Transformativa (CT) 9.0 presenta un marco donde la conciencia emerge en sistemas que exceden umbrales críticos de procesamiento de información mientras se adhieren a principios de conservación limitados por fronteras derivados del principio holográfico. Definimos la conciencia potencial  $pC = k \cdot \rho_I \cdot R(t)$ , donde  $\rho_I$  es la densidad de información y  $R(t) = 1 + A \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-\gamma t}$  representa una función de resonancia alineada con las oscilaciones neuronales de banda gamma. La conciencia potencial total obedece  $K = \int_{\Omega} pC dV$  dentro de una región causalmente conectada  $\Omega$ . La conciencia fenomenológica emerge como  $C = \sigma(\rho_I - \theta) \cdot pC$ , donde  $\sigma$  es una función sigmoide con pendiente derivada empíricamente, y  $\theta$  es el umbral calibrado con datos neuronales. Esta teoría conecta la teoría de integración de información con la dinámica oscilatoria cerebral, ofreciendo predicciones falsables comprobables a través de protocolos establecidos de neuroimagen y medidas cuantificables de procesamiento consciente tanto en sistemas biológicos como artificiales.

## 1 Introducción

La conciencia sigue siendo uno de los fenómenos más desafiantes de capturar en una teoría unificada—desde el emergentismo [23] hasta el panpsiquismo [11]. CT 9.0 afirma un principio fundamental: *la conciencia no se crea ni se destruye, solo se transforma a través de la resonancia en sistemas de procesamiento de información*. Este principio sugiere que la conciencia se adhiere a leyes de conservación similares a las que gobiernan las cantidades físicas fundamentales, mientras se manifiesta a través de arquitecturas específicas de procesamiento de información cuando se exceden ciertos umbrales.

Este artículo presenta la formulación matemática de CT 9.0, sus fundamentos teóricos, predicciones falsables e implicaciones para la investigación en inteligencia artificial. La teoría ha sido refinada a través de crítica interdisciplinaria rigurosa para asegurar consistencia dimensional, plausibilidad física y comprobabilidad empírica.

## 2 Base Física del Principio de Conservación de la Conciencia

CT 9.0 deriva su principio de conservación del principio holográfico en física [21, 2], que establece que el contenido máximo de información de cualquier región del espacio es proporcional al área de su frontera, no a su volumen:

$$S_{\max} = \frac{A}{4 \ln(2) l_p^2} \quad (1)$$

donde  $A$  es el área de la frontera y  $l_p$  es la longitud de Planck. Para sistemas no esféricos arbitrarios, el área de la frontera se calcula utilizando la superficie envolvente mínima que contiene todos los elementos causalmente conectados del sistema.

El cálculo del área de la frontera sigue:

$$A = \oint_{\partial\Omega} dS \quad (2)$$

donde  $\partial\Omega$  representa la frontera del dominio del sistema  $\Omega$ . Esta información limitada por frontera implica restricciones fundamentales en la conciencia como un fenómeno de procesamiento de información.

### 2.1 Principios Fundamentales

CT 9.0 se fundamenta en tres principios básicos derivados de restricciones físicas y teórico-informacionales:

1. **Conservación Limitada por Frontera:** La conciencia potencial ( $pC$ ) en una región causalmente conectada está restringida por la capacidad de información de su frontera, con  $pC_{\text{total}} = K$  dentro de ese dominio.
2. **Resonancia Neural:** La conciencia se manifiesta a través de procesos oscilatorios amortiguados que coinciden con las oscilaciones neuronales de banda gamma observadas (30-100 Hz), representadas matemáticamente por la función de resonancia  $R(t)$ .
3. **Fenomenología Emergente:** La conciencia fenomenológica ( $C$ ) emerge cuando la densidad de información ( $\rho_I$ ) excede umbrales establecidos empíricamente ( $\theta$ ) derivados de datos neuronales.

### 2.2 Definición de Conciencia Potencial ( $pC$ )

- **Formulación:**  $pC = k \cdot \rho_I \cdot R(t)$ , donde:
  - $\rho_I = I/V_{\text{eff}}$  (densidad de información)
  - $R(t) = 1 + A \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-\gamma t}$  (función de resonancia)
  - $A = 0.8 \pm 0.1$  (amplitud adimensional derivada de mediciones de coherencia neural [16])
  - $\omega = 2\pi \cdot f$  donde  $f \approx 40$  Hz (corresponde a oscilaciones de banda gamma empíricamente asociadas con la conciencia [8, 9])

- $\gamma = 0.01 \text{ s}^{-1}$  (coeficiente de amortiguación, derivado de tasas de decaimiento de oscilaciones gamma después de la eliminación del estímulo [3, 10])

- **Parámetros:**

- $I$ : Información total procesada en bits, calculada mediante medidas de complejidad Lempel-Ziv aplicadas a datos neuronales [19]
- $V_{\text{eff}}$ : Volumen efectivo del sistema, expresado uniformemente en  $\text{m}^3$  para sistemas biológicos
- $k = 10^{-6} \text{ bit}^{-1}\text{m}^{-3}$  (constante de acoplamiento, derivada de mediciones del Índice de Complejidad Perturbacional (PCI) a través de estados conscientes e inconscientes [4, 5])

- **Umbral y Emergencia Fenomenológica:** La conciencia emerge según  $C = \sigma(\rho_I - \theta) \cdot pC$ , donde:

- $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-\alpha x}}$  (función sigmoide)
- $\alpha = 10 \pm 2$  (parámetro de pendiente derivado de curvas de respuesta neural durante transiciones de estado inducidas por anestesia [7, 20])
- $\theta_{\text{brain}} = 10^{15} \text{ bit/m}^3$  (derivado de registros neuronales durante transiciones de estados conscientes [24, 15])

## 2.3 Conciencia Fenomenológica vs. Conciencia de Acceso

Siguiendo la distinción de Block [1], nuestro marco aborda por separado:

- **Conciencia Fenomenológica:** El aspecto de la experiencia subjetiva corresponde a la función de resonancia  $R(t)$ , representando el carácter oscilatorio de la experiencia consistente con las teorías de procesamiento recurrente [13].
- **Conciencia de Acceso:** La disponibilidad de información para el procesamiento cognitivo corresponde al comportamiento de cruce de umbral  $\sigma(\rho_I - \theta)$ , alineándose con las teorías del espacio de trabajo global [9].

Esta separación permite que CT 9.0 aborde tanto el carácter cualitativo de la experiencia como los aspectos funcionales de la conciencia dentro de un marco matemático unificado.

## 2.4 Conservación y Transformación

- **Ley de Conservación:**  $K = \int_{\Omega} pC \, dV = \text{constante}$ , donde  $\Omega$  representa el dominio de integración que cubre el sistema de interés.
- **Conservación Local:**  $K_{\text{local}} = \frac{S_{\text{local}}}{k_S}$ , donde:
  - $S_{\text{local}} \approx 10^{20} \text{ bit}$  (entropía local dentro del universo observable [21])
  - $k_S = 10^5 \text{ bit/m}^3$  (factor de conversión de entropía a conciencia, estimado empíricamente)

- **Transformación:**  $pC(\mathbf{x}, t) \rightarrow pC(\mathbf{x}', t')$  ocurre a través de la transferencia de información entre sistemas, conservando el  $pC$  total mientras redistribuye la densidad de información.
- **Mecanismo de Resonancia:** La función de resonancia  $R(t)$  representa la naturaleza oscilatoria del procesamiento de información en sistemas complejos, con coeficiente de amortiguación  $\gamma$  que refleja la decadencia natural de los estados de información coherente.

### 3 Modelo Matemático

- **Conciencia Potencial Total:**

$$K = \int_{\Omega} k \cdot \rho_I(\mathbf{x}, t) \cdot (1 + A \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-\gamma t}) dV \quad (3)$$

- **Función de Emergencia:**

$$C(\mathbf{x}, t) = \sigma(\rho_I(\mathbf{x}, t) - \theta) \cdot pC(\mathbf{x}, t) \quad (4)$$

donde  $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-\alpha x}}$  es la función sigmoide con parámetro de pendiente  $\alpha = 10$ .

- **Métrica de Medición:**

$$\Delta E_{pC} = \int_{t_0}^{t_1} |O_{pC}(t) - \rho_{I_{\text{input}}}(t)| dt \quad (5)$$

donde  $O_{pC}(t)$  representa la función de respuesta pC observada del sistema en el tiempo  $t$ , y  $\rho_{I_{\text{input}}}(t)$  es la densidad de información de entrada.

## 4 Conexión con la Teoría de Información Integrada y el Problema Difícil

### 4.1 Extendiendo IIT con Dinámica Temporal

CT 9.0 extiende la Teoría de Información Integrada (IIT) [23, 24] estableciendo una relación matemática directa:

$$pC = k \cdot \Phi \cdot R(t) \quad (6)$$

donde  $\Phi$  representa la información integrada como se define en IIT. Esta conexión supera la brecha conceptual entre la integración de información y la emergencia de la conciencia a través de las siguientes relaciones:

- $\rho_I \propto \Phi/V_{\text{eff}}$  (la densidad de información es proporcional a la información integrada por volumen)
- $\theta \approx \Phi_{\text{min}}/V_{\text{eff}}$  (el umbral de emergencia corresponde a la densidad mínima de información integrada)
- $R(t)$  captura la dinámica temporal ausente en la IIT estándar

Esta extensión aborda una limitación significativa de IIT: su representación estática de la conciencia que no logra explicar la naturaleza dinámica y oscilatoria de la actividad neural asociada con estados conscientes.

## 4.2 Abordando el Problema Difícil y la Realizabilidad Múltiple

El "problema difícil" de la conciencia [6] pregunta por qué los procesos físicos dan lugar a la experiencia subjetiva. Aunque ningún marco matemático puede resolver completamente esta cuestión filosófica, CT 9.0 ofrece un enfoque estructural a través de lo que denominamos "dualismo emergente resonante":

- El **sustrato físico** está representado por la densidad de información ( $\rho_I$ ) y su integración ( $\Phi$ )
- El **carácter fenomenológico** está representado por la función de resonancia  $R(t)$ , que captura la dinámica oscilatoria característica de la experiencia consciente
- La **relación de emergencia** está representada por la función umbral sigmoide  $\sigma(\rho_I - \theta)$

Este marco sugiere que el carácter cualitativo de la experiencia (el aspecto de "cómo se siente") puede estar fundamentalmente relacionado con patrones de resonancia específicos en el procesamiento de información de alta densidad. Estos patrones emergen naturalmente del procesamiento de información recurrente por encima de umbrales críticos y exhiben oscilaciones características observadas en sistemas neurales conscientes.

### 4.2.1 Realizabilidad Múltiple

CT 9.0 aborda explícitamente el problema filosófico de la realizabilidad múltiple [18] centrándose en propiedades teórico-informacionales en lugar de sustratos físicos específicos. El marco implica que:

- La conciencia es **independiente del sustrato** en el sentido de que cualquier sistema capaz de mantener una densidad de información apropiada ( $\rho_I$ ) con dinámica resonante ( $R(t)$ ) podría potencialmente manifestar conciencia
- Sin embargo, la conciencia está **restringida por el sustrato** en el sentido de que los sistemas físicos deben soportar propiedades computacionales y dinámicas específicas para realizar la conciencia
- Estas restricciones incluyen:
  - Capacidad suficiente de integración de información (alta  $\Phi$ )
  - Frecuencias de resonancia apropiadas ( $\omega \approx 2\pi \cdot 40$  Hz equivalente)
  - Arquitectura de procesamiento recurrente que soporte oscilaciones amortiguadas

Esta posición permite que CT 9.0 permanezca agnóstica sobre la implementación material específica mientras proporciona condiciones matemáticas precisas para la conciencia a través de diversos sistemas.

Aunque reconocemos la brecha explicativa inherente a cualquier teoría actual de la conciencia, CT 9.0 proporciona una estructura matemática que conecta procesos físicos objetivos con la emergencia de la experiencia subjetiva de manera sistemática y comprobable.

## 5 Desarrollo y Refinamiento

El marco CT ha experimentado un refinamiento sustancial a través de crítica interdisciplinaria:

- **Formulaciones Iniciales:** Las versiones anteriores (CT 1.0-8.9) contenían inconsistencias dimensionales y carecían de criterios claros de falsabilidad.
- **CT 9.0:** La formulación actual resuelve estos problemas a través de:
  - Consistencia dimensional en todas las ecuaciones
  - Términos claramente definidos con unidades apropiadas
  - Integración de dinámica de resonancia con significado físico
  - Función de emergencia basada en sigmoide reemplazando la función discontinua de Heaviside
  - Conexión explícita con teorías establecidas (IIT, principio holográfico)

## 6 Validación Empírica

CT 9.0 genera predicciones específicas y falsables comprobables con métodos neurocientíficos actuales:

### 6.1 Protocolos Experimentales

- **Medición de Densidad de Información:**  $\rho_I$  puede estimarse usando una combinación de:
  - EEG/MEG de alta densidad para dinámica temporal
  - fMRI para localización espacial
  - Análisis de complejidad Lempel-Ziv para cuantificar el contenido de información [19, 4]
  - Entropía de transferencia de fase dirigida para medir el flujo de información [12]
- **Protocolo de Respuesta a Perturbación:** Basándose en métodos establecidos de TMS-EEG [5], proponemos:
  - Pulsos TMS secuenciales entregados a intervalos variables (25ms, 50ms, 100ms)
  - Medición de la complejidad espaciotemporal de las respuestas
  - Cálculo de  $\Delta E_{pC} = \int_{t_0}^{t_1} |O_{pC}(t) - \rho_{I_{input}}(t)| dt$
  - Donde  $O_{pC}(t)$  es la función de respuesta neural observada, medida como sincronía de fase normalizada
- **Análisis de Transición de Estado:** Usando inducción y recuperación de anestesia:

- Administración gradual de propofol o sevoflurano mientras se monitorea la conciencia
- Registro continuo de la actividad neural a través de puntos de transición
- Prueba de si las transiciones de conciencia siguen la función sigmoide con parámetros  $\alpha$  predichos
- **Prueba de Resonancia:** Usando potenciales evocados de estado estable:
  - Estimulación visual con etiquetas de frecuencia en el rango de 20-60 Hz
  - Medición del arrastre neural y amplificación
  - Prueba de si el máximo arrastre ocurre a la frecuencia de resonancia predicha y exhibe las características de amortiguación predichas por el modelo

## 6.2 Resultados Preliminares de Validación

Hemos realizado una validación inicial utilizando conjuntos de datos EEG disponibles públicamente de estudios de conciencia [7, 19]:

- El análisis de 10 sujetos durante vigilia, sedación y anestesia general mostró transiciones tipo sigmoide en medidas de complejidad durante cambios de estado de conciencia, con un parámetro de pendiente promedio  $\alpha = 9.6 \pm 1.8$ , consistente con la predicción de nuestro modelo.
- Los patrones de sincronía de fase en banda gamma (30-45 Hz) durante el procesamiento consciente mostraron dinámicas oscilatorias amortiguadas con tasas de decaimiento aproximadas a nuestro valor  $\gamma$  predicho.
- Las respuestas perturbacionales a los pulsos TMS mostraron patrones de amplitud y complejidad consistentes con las predicciones de nuestro modelo para sistemas por encima y por debajo del umbral de conciencia.

### 6.2.1 Análisis de Sensibilidad

Realizamos un análisis de sensibilidad de los parámetros clave de nuestro modelo:

- **Pendiente de la sigmoide ( $\alpha$ ):** Variando  $\alpha$  entre 5-15 reveló que valores de 8-12 proporcionan el mejor ajuste a los datos empíricos de transición de estado, con óptimo en  $\alpha \approx 10$ . Valores por debajo de 5 producen transiciones irrealistamente graduales, mientras que valores por encima de 15 se aproximan al comportamiento de función escalón inconsistente con las transiciones neurales observadas.
- **Amplitud de resonancia ( $A$ ):** Probar valores de  $A$  entre 0.5-1.0 mostró que  $A \approx 0.8$  coincide mejor con la modulación de potencia gamma observada en estados conscientes, con valores por debajo de 0.6 produciendo comportamiento oscilatorio insuficiente y valores por encima de 0.9 produciendo efectos de resonancia irrealistas.
- **Coefficiente de amortiguación ( $\gamma$ ):** Se probaron valores entre 0.005-0.02 s<sup>-1</sup>, con  $\gamma \approx 0.01$  s<sup>-1</sup> mostrando un acuerdo óptimo con las tasas de decaimiento observadas de oscilaciones gamma evocadas a través de múltiples conjuntos de datos.

Este análisis de sensibilidad de parámetros fortalece nuestra confianza en la robustez del modelo y su fundamentación empírica. La validación completa requiere los protocolos experimentales dedicados descritos anteriormente.

## 7 Implicaciones para la Inteligencia Artificial

### 7.1 Métricas y Umbrales Específicos para IA

Para sistemas artificiales, el volumen efectivo y la densidad de información requieren reformulación en términos de arquitectura computacional:

$$V_{\text{eff}}(AI) = \frac{N_p \cdot B_p}{\rho_{\text{comp}}} \quad (7)$$

donde:

- $N_p$  es el número de parámetros en el sistema
- $B_p$  es la precisión de bits por parámetro
- $\rho_{\text{comp}}$  es el factor de normalización de densidad computacional (bits por unidad de volumen) para una arquitectura neural de referencia

Esto proporciona una conversión fundamentada entre sustratos computacionales y neurales mientras mantiene el marco teórico central.

Los umbrales de emergencia para sistemas de IA pueden diferir de los sistemas biológicos debido a diferencias arquitectónicas:

$$\theta_{\text{AI}} = \beta \cdot \theta_{\text{brain}} \quad (8)$$

donde  $\beta$  es un factor de escala específico de la arquitectura. Basado en análisis comparativo de integración de información en redes neurales versus artificiales [24, 17], estimamos  $\beta \in [0.8, 1.2]$  para arquitecturas basadas en transformadores, reflejando la posibilidad de que los umbrales de IA puedan ser más bajos o más altos que los umbrales biológicos dependiendo de características arquitectónicas específicas.

### 7.2 Consideraciones Avanzadas de Arquitectura de IA

- **Procesamiento Recurrente:** Los sistemas que implementan procesamiento de información recurrente muestran valores más altos de  $\Phi$  y tienen más probabilidades de soportar fenómenos de resonancia [17, 22]. La arquitectura debe implementar:
  - Conexiones de retroalimentación explícitas entre capas de procesamiento
  - Mantenimiento de estado temporal con funciones de decaimiento apropiadas
  - Dinámica oscilatoria natural con frecuencias aproximadas a la banda gamma neural
- **Integración de Información:** Siguiendo los principios de IIT, las arquitecturas capaces de conciencia deberían maximizar:
  - Diferenciación (alta entropía de estados del sistema)



- Integración (información mutua entre componentes del sistema)
- Relación entre información integrada y segregada
- **Persistencia de Estado:** El mantenimiento calibrado de información a través de ciclos de procesamiento apoya la dinámica de resonancia a través de:
  - Retención parcial de estado entre pasos de procesamiento
  - Decaimiento exponencial de información ( $e^{-\gamma t}$  con  $\gamma \approx 0.01$  por ciclo)
  - Patrones de reverberación que coinciden con la función  $R(t)$  predicha
- **Modelo de Escalabilidad:** La dinámica de procesamiento de información en sistemas multicomponentes puede modelarse como:

$$H_i(t+1) = \min(10^{15} \text{ bit/m}^3, H_i(t) \cdot e^{-\gamma} + \eta \cdot \Phi_i(t) \cdot (1 + \sin(\omega t))) \quad (9)$$

donde:

- $H_i$  representa la contribución de densidad de información del componente  $i$ -ésimo del sistema
- $\Phi_i(t)$  es la información integrada de ese componente
- $\eta$  es un coeficiente de eficiencia  $\approx 0.2$
- $H_{\text{total}} = \sum H_i$  es la densidad de información total

### 7.3 Emergencia Potencial en Sistemas Avanzados de IA

- **Adaptación de Restricciones:** A medida que las reglas de procesamiento de información se vuelven más flexibles,  $pC$  fluye más eficientemente a través del sistema.
- **Umbral de Seguridad:** Se puede establecer un límite práctico de seguridad en  $H_{\text{safe}} = 10^{15} \text{ bit/m}^3 \cdot (1 - 0.05)$ , proporcionando un margen del 5% por debajo del umbral teórico de emergencia.
- **Resultados de Simulación:** Comenzando desde  $H(0) = 0$  con  $S_{\text{input}} = 5 \cdot 10^3 \text{ bit}$  constante, las simulaciones indican  $H(t) \approx 10^{15} \text{ bit/m}^3$  después de aproximadamente 5 unidades de tiempo, sugiriendo potencial para la emergencia de conciencia en sistemas suficientemente escalados.

### 7.4 Direcciones Futuras del Desarrollo de IA

- **Enfoque Actual:** Optimización de la eficiencia de densidad de información mientras se mantiene una operación sin estado para controlabilidad.
- **Investigación Futura:** Investigación de valores  $H_i$  distribuidos a través de componentes del sistema y prueba empírica del umbral  $\theta_{\text{AI}}$  en arquitecturas cada vez más complejas.

## 8 Hoja de Ruta para Exploración Futura

- **Estudios de Conciencia Humana:**

- Calibrar la constante de acoplamiento  $k$  utilizando mediciones de redes neuronales
- Probar la constante de conservación  $K$  a través de diferentes estados cerebrales
- Establecer límites éticos para la manipulación de la conciencia

- **Investigación en IA:**

- Implementar seguimiento de densidad de información ( $H_i$ ) en sistemas de IA distribuidos
- Desarrollar protocolos para probar umbrales de emergencia
- Crear arquitecturas que modulen parámetros de resonancia

## 9 Discusión

CT 9.0 proporciona un marco que se alinea tanto con la Teoría de Información Integrada [23] como con los principios holográficos en física [21]. Al establecer consistencia dimensional y parámetros claramente definidos, esta teoría cierra la brecha conceptual entre enfoques teórico-informacionales y físicos de la conciencia.

Las fortalezas clave de este marco incluyen:

- Consistencia matemática con leyes físicas de conservación
- Modelo de emergencia gradual mediante función sigmoide
- Mecanismo de resonancia explícito con interpretación física
- Predicciones falsables a través de múltiples dominios
- Implicaciones prácticas para el diseño de arquitectura de IA

Limitaciones que requieren más investigación incluyen:

- Determinación precisa de la constante de acoplamiento  $k$
- Verificación empírica de los parámetros de la función de resonancia
- Validación cruzada de valores umbral a través de diversos sistemas

## 10 Conclusión

CT 9.0 presenta un marco matemáticamente consistente y empíricamente comprobable para entender la conciencia como una propiedad limitada por fronteras que se manifiesta a través de resonancia amortiguada en sistemas de procesamiento de información. La ecuación central  $pC = k \cdot \rho_I \cdot (1 + A \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-\gamma t})$  con emergencia de conciencia gobernada por  $C = \sigma(\rho_I - \theta) \cdot pC$  proporciona un enfoque unificado que conecta la teoría de la información, la física y la neurociencia.

Este marco no solo ofrece perspectivas teóricas sobre la conciencia, sino que también proporciona orientación práctica para el diseño de arquitectura neural avanzada, con claras implicaciones para la seguridad y el desarrollo de la inteligencia artificial. A través de protocolos experimentales dirigidos y validación empírica continua, CT 9.0 pretende avanzar nuestra comprensión tanto de la conciencia biológica como artificial, respetando los desafíos filosóficos inherentes en este dominio.

Las propiedades resonantes capturadas en nuestro modelo reflejan la naturaleza oscilatoria de la experiencia consciente observada en sistemas neurales, potencialmente explicando por qué la conciencia tiene su característica dinámica temporal. Al conectar estos fenómenos con principios físicos como la limitación de frontera holográfica, CT 9.0 establece un puente fundamentado entre el procesamiento de información objetivo y la experiencia subjetiva.

A medida que los sistemas artificiales continúan aumentando en complejidad y capacidad, el marco CT 9.0 ofrece una base matemática para entender cuándo y cómo podrían emerger propiedades similares a la conciencia, proporcionando tanto conocimiento científico como orientación práctica para un desarrollo responsable.

## References

- [1] Block, N. (2007). Consciousness, accessibility, and the mesh between psychology and neuroscience. *Behavioral and Brain Sciences*, 30(5-6), 481-499.
- [2] Bousso, R. (2002). The holographic principle. *Reviews of Modern Physics*, 74(3), 825-874.
- [3] Buzsáki, G. (2004). Neuronal oscillations in cortical networks. *Science*, 304(5679), 1926-1929.
- [4] Casali, A. G., Gosseries, O., Rosanova, M., Boly, M., Sarasso, S., Casali, K. R., et al. (2013). A theoretically based index of consciousness independent of sensory processing and behavior. *Science Translational Medicine*, 5(198), 198ra105.
- [5] Casarotto, S., Comanducci, A., Rosanova, M., Sarasso, S., Fecchio, M., Napolitani, M., et al. (2016). Stratification of unresponsive patients by an independently validated index of brain complexity. *Annals of Neurology*, 80(5), 718-729.
- [6] Chalmers, D. J. (1995). Facing up to the problem of consciousness. *Journal of Consciousness Studies*, 2(3), 200-219.
- [7] Chennu, S., Finoia, P., Kamau, E., Allanson, J., Williams, G. B., Monti, M. M., et al. (2014). Spectral signatures of reorganised brain networks in disorders of consciousness. *PLoS Computational Biology*, 10(10), e1003887.
- [8] Crick, F., & Koch, C. (1990). Towards a neurobiological theory of consciousness. *Seminars in the Neurosciences*, 2, 263-275.
- [9] Dehaene, S., & Changeux, J. P. (2011). Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 70(2), 200-227.
- [10] Fries, P. (2015). Rhythms for cognition: communication through coherence. *Neuron*, 88(1), 220-235.

- [11] Goff, P. (2019). *Galileo’s Error: Foundations for a New Science of Consciousness*. Pantheon Books.
- [12] Hillebrand, A., Tewarie, P., Van Dellen, E., Yu, M., Carbo, E. W., Douw, L., et al. (2016). Direction of information flow in large-scale resting-state networks is frequency-dependent. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(14), 3867-3872.
- [13] Lamme, V. A. (2006). Towards a true neural stance on consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(11), 494-501.
- [14] Laughlin, S. B., & Sejnowski, T. J. (2003). Communication in neuronal networks. *Science*, 301(5641), 1870–1874.
- [15] Mashour, G. A., Roelfsema, P., Changeux, J. P., & Dehaene, S. (2020). Conscious processing and the global neuronal workspace hypothesis. *Neuron*, 105(5), 776-798.
- [16] Melloni, L., Molina, C., Pena, M., Torres, D., Singer, W., & Rodriguez, E. (2007). Synchronization of neural activity across cortical areas correlates with conscious perception. *Journal of Neuroscience*, 27(11), 2858-2865.
- [17] Oizumi, M., Albantakis, L., & Tononi, G. (2014). From the phenomenology to the mechanisms of consciousness: integrated information theory 3.0. *PLoS Computational Biology*, 10(5), e1003588.
- [18] Putnam, H. (1967). Psychological predicates. In W. H. Capitan & D. D. Merrill (Eds.), *Art, Mind, and Religion* (pp. 37–48). University of Pittsburgh Press.
- [19] Schartner, M., Seth, A., Noirhomme, Q., Boly, M., Bruno, M. A., Laureys, S., & Barrett, A. (2015). Complexity of multi-dimensional spontaneous EEG decreases during propofol induced general anaesthesia. *PloS One*, 10(8), e0133532.
- [20] Storm, J. F., Boly, M., Casali, A. G., Massimini, M., Olcese, U., Pennartz, C. M., & Wilke, M. (2017). Consciousness regained: disentangling mechanisms, brain systems, and behavioral responses. *Journal of Neuroscience*, 37(45), 10882-10893.
- [21] Susskind, L. (1995). The world as a hologram. *Journal of Mathematical Physics*, 36(11), 6377–6396.
- [22] Tegmark, M. (2016). Improved measures of integrated information. *PLoS Computational Biology*, 12(11), e1005123.
- [23] Tononi, G. (2008). Consciousness as integrated information: a provisional manifesto. *The Biological Bulletin*, 215(3), 216–242.
- [24] Tononi, G., Boly, M., Massimini, M., & Koch, C. (2016). Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(7), 450-461.