


El darwinismo cuántico y la interpretación existencial: cuestiones ontológicas

Juan Campos Quemada

Universidad Complutense de Madrid <https://dx.doi.org/10.5209/resf.102320>

Recibido: 22/04/2025 • Aceptado: 25/05/2025 • Publicado en línea: 28/5/2025

Resumen: Este artículo ofrece un análisis crítico y sistemático de la propuesta de solución al problema de la medida desarrollada por Wojciech H. Zurek, centrada en el concepto de Darwinismo Cuántico y su extensión en la interpretación existencial. Partiendo de una revisión del marco conceptual clásico y cuántico de la medición, se examina cómo Zurek intenta reconciliar el formalismo unitario de la mecánica cuántica con la experiencia de observación de resultados definidos en sistemas macroscópicos. Se analiza el modelo de medición como interacción entre sistema y aparato, destacando el papel de la *decoherencia* y la redundancia informacional en la emergencia de la objetividad. El concepto de *extanton* (núcleo más halo informacional) se introduce como unidad funcional que modela la existencia objetiva en contextos cuánticos. El artículo evalúa la consistencia ontológica de esta propuesta y su relación con las interpretaciones de Bohr y Everett, así como su capacidad para proporcionar una descripción físicamente fundamentada del mundo clásico emergente. Finalmente, se discuten sus implicaciones filosóficas, y se pone en cuestión si este enfoque constituye una verdadera solución al problema de la medida o si permanece en un nivel operativo y fenomenológico.

Palabras clave: darwinismo cuántico; interpretación existencial; ontología; problema de la medida; muchos mundos.

^{EN} Quantum Darwinism and Existential Interpretation: Ontological Issues

Abstract: This article critically analyzes Zurek's proposal to the measurement problem, centered on Quantum Darwinism and the existential interpretation. It examines how this perspective seeks to reconcile the unitary formalism with the observation of definite outcomes in macroscopic systems, highlighting the role of decoherence and informational redundancy in the emergence of objectivity. The concept of *extanton* is introduced as a model of objective existence, and its ontological coherence and relation to the interpretations of Bohr and Everett are evaluated. Finally, the article discusses the philosophical implications of this proposal, and its effectiveness as a solution to the measurement problem.

Keywords: quantum darwinism; existential interpretation; ontology; measurement problem; many worlds.

Sumario: 1. Introducción; 2. *Decoherencia* y Darwinismo Cuántico: hacia una solución del problema de la medida; 2.1. Darwinismo Cuántico: el entorno como canal de información; 3. La interpretación existencial: a medio camino entre Bohr y Everett; 3.1. La visión de la complementariedad en Zurek; 3.2. La interpretación del estado relativo de Everett en la versión de Zurek; 4. Interpretación existencial y ontología; 4.1. Buscando los “beables” de John Bell; 4.2. El concepto de realidad y objetividad en la interpretación existencial; 4.3. Buscando claridad ontológica; 5. Discusión y conclusiones; 6. Referencias bibliográficas; 7. Apéndice.

Cómo citar: Campos Quemada, J. “El darwinismo cuántico y la interpretación existencial: cuestiones ontológicas”, *Revista de Filosofía*, avance en línea, <https://dx.doi.org/10.5209/resf.102320>

1. Introducción

En la física clásica, medir no plantea dificultades: consideramos que los objetos tienen propiedades bien definidas, y la medición simplemente revela esos valores sin alterar el sistema de forma significativa. En cambio, en la mecánica cuántica el panorama es diferente. Cuando tratamos de describir lo que ocurre al medir un sistema cuántico —como un electrón— con un aparato macroscópico, y seguimos estrictamente el formalismo cuántico, nos encontramos con un resultado desconcertante: el sistema total (microscópico + macroscópico) no queda en un único estado, sino en una superposición macroscópica de todos los posibles resultados. No es que el sistema “esté en varios estados a la vez” en un sentido clásico, sino que el propio lenguaje matemático de la teoría describe el estado como una combinación de posibilidades que aún no se han resuelto en un único resultado. Con otras palabras, no obtenemos propiedades bien definidas del sistema.

El ejemplo más conocido es el del gato de Schrödinger: un gato encerrado en una caja cuyo destino depende de un evento cuántico. Según la teoría, el sistema compuesto por el átomo, el mecanismo y el gato queda en una superposición que no podemos interpretar claramente: el gato no está vivo, ni muerto, ni ambas cosas. Simplemente, no sabemos a qué corresponde exactamente ese estado de superposición. Este es el famoso problema de la medida (Myrvold, 2022). En pocas palabras, para resolver el problema debemos explicar cómo pasamos de la superposición cuántica a la experiencia concreta de obtener un solo resultado bien definido.

La interpretación ortodoxa aborda el problema de la medida introduciendo una regla externa —el colapso del estado— que, mediante la regla de Born, asigna probabilidades sin derivarlas del propio formalismo. Este enfoque, de corte instrumentalista u operacionalista, concibe el mundo en términos de operaciones experimentales como preparación, medida y amplificación de la información. Propone dos dinámicas incompatibles según se considere la interacción interna o externa: una dinámica lineal, continua y reversible en ausencia de medición, donde las propiedades permanecen indeterminadas; y otra no lineal, discontinua e irreversible durante el proceso de medición, que asigna valores definidos. Esta dualidad genera un marco teórico dual para describir la materia¹, plantea dudas sobre los criterios que cualifican a un sistema como “medidor”, la posibilidad de reducir la medida a procesos más elementales, su aplicabilidad al universo como totalidad, y el modo en que emerge la física clásica a partir del formalismo cuántico.

Frente a esta postura, los enfoques realistas afirman que los sistemas individuales poseen propiedades que el formalismo puede predecir probabilísticamente, eliminan la medida como noción fundamental y atribuyen a los estados cuánticos un papel representacional. Estas propuestas se dividen en dos grupos. El primero mantiene un espacio (tri/tetradimensional) habitado por entidades con propiedades definidas y modifica el formalismo: añadiendo variables ocultas (como en la mecánica bohmiana) o incorporando mecanismos de colapso espontáneo. El segundo conserva la evolución lineal y la completitud formal, pero sostiene una multiplicidad de resultados simultáneos (interpretaciones de muchos mundos, muchas mentes, o del estado relativo). Estas últimas deben afrontar dos desafíos: justificar ontológicamente la coexistencia de múltiples realidades y explicar cómo, desde un estado cuántico global y multidimensional, se deriva la percepción de un mundo clásico tridimensional.

Este artículo presenta un análisis crítico del programa de investigación desarrollado por Wojciech H. Zurek y sus colaboradores², el cual busca abordar el problema de la medida en mecánica cuántica desde una posición intermedia entre el instrumentalismo asociado a la interpretación de Bohr, que subraya el papel del observador y evita compromisos ontológicos fuertes, y el realismo característico de la interpretación de los muchos mundos, que asume la existencia objetiva de todas las ramas de la función de onda. La originalidad y relevancia del enfoque de Zurek radica en su intento de postular un mundo cuántico subyacente capaz de dar cuenta, sin introducir colapsos ni discontinuidades ad hoc, de la emergencia del mundo clásico tal como se manifiesta en nuestra experiencia ordinaria. Al situarse entre estos polos interpretativos, la propuesta de Zurek plantea preguntas fundamentales sobre la naturaleza de la objetividad, la relación entre teoría y realidad, y los límites de nuestras categorías ontológicas en el contexto de la física cuántica.

Este trabajo se estructura en varias secciones. En primer lugar, se presentan los fundamentos teóricos del enfoque de Zurek, centrados en la teoría de la decoherencia y el Darwinismo Cuántico (sección 2), como mecanismos que explican la transición desde la superposición cuántica hacia la experiencia de resultados definidos. A continuación, se examina la interpretación existencial (sección 3), que busca establecer un vínculo entre el formalismo cuántico y la realidad objetiva, contextualizándola críticamente frente a otras interpretaciones históricas como las de Bohr y Everett. Posteriormente, se analizan los supuestos ontológicos

¹ El famoso corte de Heisenberg entre el marco teórico clásico y el cuántico.

² Tras enviar este artículo a revisión, tuve conocimiento de la publicación reciente del nuevo libro de Zurek (2025), que no había estado disponible al momento de redactar el texto. Aunque no fue posible integrarlo plenamente en el análisis, adelanto que algunas de sus conclusiones parecen reforzar los argumentos aquí expuestos, especialmente en lo relativo a su proximidad con un neokantismo de corte pragmatista cercano a la propuesta de Bohr. Una consideración más detallada de esta obra quedará para futuros desarrollos.

implicados en esta interpretación (sección 4), profundizando en nociones clave como la de existencia objetiva y su relación con la dinámica unitaria de la teoría cuántica. Finalmente, se discuten las implicaciones filosóficas del enfoque de Zurek, evaluando si su propuesta constituye una explicación físicamente sólida y ontológicamente coherente de la emergencia de la realidad clásica, o si se limita a una reconstrucción formal del problema.

2. *Decoherencia y Darwinismo Cuántico: hacia una solución del problema de la medida*

En esta sección se examina cómo la teoría de la *decoherencia*, junto con el Darwinismo Cuántico propuesto por Zurek, ofrece una vía para explicar la emergencia de la realidad clásica sin recurrir a postulados externos como el colapso. Ambos enfoques articulan un marco dinámico donde la interacción con el entorno selecciona y estabiliza ciertos estados, permitiendo comprender cómo lo clásico se desprende de lo cuántico.

El programa de la *decoherencia* cuántica, ampliado por el Darwinismo Cuántico y la interpretación existencial, busca explicar cómo la experiencia clásica del mundo puede emerger a partir de una descripción cuántica fundamental de la realidad siguiendo exclusivamente el formalismo cuántico sin la imposición del algoritmo de la medida: (1) el *principio de completitud*: el estado de un sistema cuántico se representa mediante un vector en el espacio de Hilbert correspondiente; (2) el *principio de dinámica unitaria*: la evolución de los estados cuánticos está gobernada por transformaciones unitarias, según la ecuación de Schrödinger y (3) el *principio de composición de sistemas*: el estado de un sistema cuántico compuesto reside en el producto tensorial de los espacios de Hilbert asociados a sus subsistemas³.

La *decoherencia* es un proceso físico cuya representación matemática se ajusta a los postulados así descritos y que puede entenderse de la manera siguiente: dado que ningún sistema cuántico está completamente aislado, la interacción inevitable con el entorno conduce a un *entrelazamiento* que transforma el estado coherente inicial en un estado que aparenta ser una mezcla estadística clásica.

Sin embargo, la *decoherencia* no explica cómo se selecciona un único resultado definido entre los posibles. Es decir, no contiene una operación como el colapso de la función de onda que decida entre las componentes, ni proporciona un mecanismo claro para la emergencia de una sola realidad observada y, por tanto, no resuelve el problema de la medida.

Por otro lado, la mezcla resultante del proceso es impropia: los solapamientos cuánticos no se eliminan por completo, sino que permanecen deslocalizados en los grados de libertad del entorno. La supresión total de interferencias requiere idealizar un entorno con infinitos grados de libertad. Además, no puede asumirse en general que la base del puntero coincida con los autoestados de la matriz de densidad reducida, ya que estos suelen ser inestables en el tiempo y dependen del estado inicial del sistema⁴ (Schlosshauer, 2007), lo que impide considerarlos clásicos. En ausencia de un criterio experimental que determine la base del puntero, es necesario explicitar las condiciones dinámicas que seleccionan una base candidata a la clasicidad.

Zurek y colaboradores intentan resolver todas estas cuestiones poniendo entre paréntesis el proceso de *decoherencia* y partiendo exclusivamente del formalismo cuántico, asumiendo un principio que conecte dicho formalismo con los resultados empíricos.

En efecto, el principio de *repetibilidad* afirma que, si un sistema cuántico ha sido medido y se ha obtenido un cierto resultado, una medición inmediatamente posterior del mismo observable debe devolver el mismo valor (Zurek, 2022, pp. 15 y ss.). En otras palabras, el estado del sistema no debe cambiar como consecuencia de una medición. Este postulado se refiere a mediciones no destructivas (*nondemolition*), que preservan el estado medido y permiten confirmar el resultado una y otra vez.

Este principio permite atribuir significado físico al concepto de «estado» cuántico, en tanto que solo aquello que puede ser identificado de manera repetible —es decir, que puede confirmarse mediante re-mediciones sin ser alterado— merece tal designación. La exigencia de repetibilidad conduce inevitablemente a la selección de estados distinguibles o cuasi distinguibles, lo cual implica que los únicos candidatos válidos a ser resultados estables de una medición son los estados ortogonales o, en ciertos contextos prácticos, cuasi ortogonales⁵. Solo estos estados pueden ser copiados, transferidos o registrados sin perturbación, lo que es condición necesaria para la adquisición de información fiable y para la formación de registros robustos.

La repetibilidad es esencial para derivar la estructura discreta de los resultados —los saltos cuánticos— a partir de los postulados centrales de la mecánica cuántica, sin necesidad de postular colapsos de la función de onda y los *observables* físicos deben representarse mediante *operadores hermíticos*, cuyos autovalores y autoestados cumplen con esta propiedad de distinguibilidad (Zurek, 2022, p. 91). La discreción de los resultados emerge como una consecuencia directa de la tensión entre la linealidad de la evolución cuántica y la

³ Ver apéndice.

⁴ Ver apéndice.

⁵ En mecánica cuántica, dos estados son distinguibles sin ambigüedad si son ortogonales en el *espacio de Hilbert*, es decir, si su producto interno es cero. Esta condición garantiza que pueden diferenciarse mediante una medición adecuada.

no linealidad de los procesos de copia y amplificación de información, siendo así una propiedad emergente del proceso de medición en sí mismo.

Dentro de este marco, dos conceptos técnicos adicionales desempeñan un papel esencial en la transición cuántico-clásica: la envariancia y la einselección.

La *envariancia* (*entanglement-assisted invariance*) es una simetría característica de los estados entrelazados. Un sistema compuesto es envariante si una transformación local aplicada a un subsistema puede ser compensada mediante una transformación en su entorno, de modo que el estado global se mantenga inalterado. Esto significa que, aunque localmente el estado cambie, la estructura del entrelazamiento garantiza que dicha modificación sea globalmente reversible e indetectable (Zurek, 2010, p. 417). Esta propiedad permite derivar de forma no circular la *regla de Born* como una consecuencia natural de las simetrías del entrelazamiento, sin postularla (Ibíd., pp. 417-425). La envariancia proporciona un fundamento objetivo para la noción de probabilidad en mecánica cuántica (Zurek, 2022, p. 28). Las probabilidades son una medida de la distribución de registros confiables y reproducibles en el entorno tras una interacción cuántica. En el marco de la interpretación existencial, las probabilidades emergen de la estructura de entrelazamiento entre sistema, entorno y observador y expresan la frecuencia esperada con la que ciertos registros aparecerán en ramas o historias cuánticas correlacionadas con el observador.

La *einselección* (*environment-induced superselection*) designa el mecanismo mediante el cual el entorno selecciona dinámicamente un subconjunto de estados del sistema —los *estados de puntero*— que se mantienen estables frente a la *decoherencia*. Este proceso no es arbitrario, sino que actúa como un filtro dinámico, determinado por la forma específica de la interacción sistema-entorno. En este marco, Zurek introduce el concepto de *tamiz de predictibilidad*, que postula que solo aquellos estados accesibles de forma repetida y no perturbativa pueden considerarse clásicos. Dicha selección funcional favorece los estados que permanecen robustos bajo monitoreo ambiental continuo, y está gobernada por la estructura del Hamiltoniano de interacción⁶ del sistema, el aparato y el entorno, en particular por los autoestados del observable que conmuta con él.

La einselección y la repetibilidad basada en envariancia constituyen enfoques complementarios para explicar la emergencia de la realidad clásica a partir de la cuántica (Zurek, 2022, p. 20). Los autoestados del observable, al ser resistentes al entrelazamiento destructivo, son los únicos capaces de dejar huellas estables en el entorno, resolviendo así el problema de la base preferente. Además, la combinación de envariancia y einselección permite derivar la decoherencia a partir de las simetrías del entrelazamiento, sin recurrir a la regla de Born ni a matrices de densidad reducida, lo que refuerza la estabilidad de los estados seleccionados y fundamenta la transición hacia un mundo con apariencia clásica.

2.1. Darwinismo Cuántico: el entorno como canal de información

Ahora bien, todavía permanece sin resolverse el aspecto crucial de cómo los observadores obtienen un único resultado definido tras la medición. Para abordar esta cuestión, Zurek sugiere que los observadores no acceden al sistema cuántico de forma directa, sino indirectamente a través del entorno, en una analogía con la percepción sensorial clásica. Así como en la visión humana solo se detecta una fracción de los fotones dispersados por los objetos, en el contexto cuántico la información relevante sobre el sistema también se encuentra diseminada en múltiples fragmentos del entorno.

En este marco conceptual, el entorno no solo induce la *decoherencia*, sino que actúa como canal de información, a través del cual los observadores acceden a los estados del sistema. Los estados puntero —aquellos que resultan más estables en la interacción con el entorno— son precisamente los que logran copiarse con mayor fidelidad y redundancia en distintos sectores del ambiente. Esta capacidad de “reproducirse” con alta precisión es lo que Zurek denomina Darwinismo Cuántico, por analogía con la selección natural: sólo los estados que pueden dejar múltiples “réplicas informacionales”⁷ en el entorno sobreviven como candidatos observables. Estas copias o réplicas, Zurek no las entiende como duplicaciones materiales del sistema, sino como correlaciones cuánticas redundantes que permiten que un observador acceda a la misma información (sobre el estado del sistema) desde diferentes partes del entorno, sin perturbarlo.

Los dos conceptos matemáticos de alto nivel que emplea Zurek en el proceso “darwinista” son la información mutua cuántica y la discordancia cuántica.

La *información mutua cuántica*⁸ mide la cantidad total de información (clásica y cuántica) sobre un sistema accesible en un fragmento del entorno, y sirve como base para evaluar la *redundancia informativa*, es decir, cuántas copias del estado del sistema están dispersas en distintos fragmentos (Zurek, 2022, p. 51).

⁶ El Hamiltoniano es el operador que representa la energía total del sistema y rige su evolución temporal. Si un observable conmuta con el Hamiltoniano, ambos pueden tener valores definidos simultáneamente.

⁷ Zurek utiliza de una manera muy libre conceptos que no son equivalentes como los de copia, réplica, correlación, información, estado, etc. (Zurek, 1998, p.14)

⁸ Ver Apéndice.

Para que la información sea considerada objetiva, la discordancia, que cuantifica la porción de información no accesible mediante mediciones locales clásicas, debe ser baja o nula, permitiendo así su acceso mediante observaciones clásicas locales en los distintos fragmentos del entorno.

En la propuesta de Zurek, el entorno cumple un doble papel esencial: selecciona dinámicamente los *estados más robustos* —aptos para volverse clásicos— y permite la *proliferación accesible de información* sobre dichos estados a múltiples observadores, posibilitando así una experiencia objetiva y compartida de la realidad cuántica.

Para ello, el entorno debe estar *estructurado y fragmentado*, de modo que evite interferencias entre mediciones independientes. Esta organización permite que distintos observadores accedan repetidamente a los *estados de puntero*, que son estables, accesibles y no invasivos, propiedades fundamentales del comportamiento clásico.

Por tanto, la objetividad de los resultados medidos no deriva de una realidad independiente, sino de la intersubjetividad: múltiples observadores, al acceder a información redundante y coherente, coinciden en sus observaciones, otorgando así estabilidad y consenso al conocimiento compartido del mundo físico.

En definitiva, para Zurek la transición cuántico-clásico y el acceso a los resultados bien definidos es fruto de un proceso de transferencia de información entre los sistemas y el entorno: la «progenie» del estado original se transmite a la manera de la «información genética» (2003, p. 43).

3. La interpretación existencial: a medio camino entre Bohr y Everett

Esta sección analiza la interpretación existencial como una propuesta intermedia que combina las ideas de Bohr con la coherencia unitaria de Everett, sin asumir la ontología plena de los muchos mundos.

Aunque el modelo de Zurek conecta el formalismo cuántico con la experiencia ordinaria mediante la interpretación de los estados de superposición macroscópicos, no basta por sí solo para explicar la obtención de resultados definidos en una medición. Los teoremas de insolubilidad (Fine 1993) demuestran que la evolución unitaria no es suficiente para explicar por qué se obtiene un resultado concreto a partir de un estado mezcla.

Para abordar esta limitación, Zurek (1993) recurre a una interpretación que complemente la teoría cuántica y permita responder preguntas fundamentales: ¿qué significa una superposición?, ¿por qué observamos un único resultado?, ¿cuál es el rol del observador? Los resultados de la *decoherencia* y del Darwinismo Cuántico requieren un marco interpretativo que les confiera sentido ontológico o epistemológico.

Zurek propone la interpretación existencial, en la que los *estados de puntero* —estables frente a la *decoherencia*— son los mejores candidatos para representar estados clásicos. Esta propuesta busca explicar la emergencia del mundo clásico sin recurrir a postulados arbitrarios de colapso, y tiende un puente entre la naturaleza indeterminada de lo cuántico y la estabilidad de la realidad clásica.

Además, sostiene que su enfoque es compatible tanto con la visión de Bohr —ayudando a trazar la frontera entre lo cuántico y lo clásico— como con la de Everett —al limitar la relatividad de los estados y definir ramas consistentes del vector de estado universal— (Zurek, 2010, p. 85).

La siguiente subsección se dedica a esclarecer la posición de la *interpretación existencial* en relación con estos dos enfoques.

3.1. La visión de la complementariedad en Zurek

Desde el comienzo de su carrera como investigador, Zurek mantiene una postura intermedia entre las interpretaciones de Bohr y Everett, otorgando prioridad ontológica al mundo cuántico, pero extendiendo el principio de *complementariedad* hasta sus límites. Esta línea ha sido desarrollada desde entonces en el grupo de Los Álamos, donde Zurek critica especialmente la separación tajante entre los dominios cuántico y clásico propuesta por Bohr.

Para Bohr, la descripción de los resultados de una medición debía necesariamente realizarse en términos clásicos, ya que sólo mediante conceptos clásicos —posición, trayectoria, energía, etc.— puede formularse una afirmación física comunicable y objetiva (Bohr, 1949). Esto implicaba que los aparatos de medición, aunque interactúan con sistemas cuánticos, debían mantenerse conceptualmente en el dominio clásico.

Zurek reconoce la motivación de este planteamiento: la necesidad de asegurar la comunicabilidad y objetividad de los resultados. Sin embargo, considera que esta división es epistemológicamente útil pero ontológicamente innecesaria y, más aún, problemática desde el punto de vista de una teoría física universal (Zurek, 2002, p. 3).

Según Zurek, esta frontera clásica-cuántica no es natural, ni está prescrita por la teoría. De hecho, al modelar tanto el sistema como el aparato de medición dentro del mismo marco cuántico, y al considerar su interacción con el entorno, se suprimen las interferencias entre los componentes de la superposición. Este proceso da lugar a la selección de ciertos estados robustos —los llamados *estados de puntero*— que pueden interpretarse como estados clásicos efectivos. En este contexto, Zurek (2022, p. 5) subraya que no es necesario asumir una diferencia fundamental entre los aparatos clásicos y los sistemas cuánticos, ya que la

decoherencia ofrece un mecanismo físico que explica cómo la apariencia clásica emerge desde dentro de la propia teoría cuántica.

En otras palabras, lo que Bohr introdujo como una división interpretativa, Zurek lo reemplaza con un proceso dinámico derivado del formalismo cuántico. Pero aquí no termina la reformulación del argumento de Bohr. Zurek y Streltsov (2013) investigan en qué condiciones puede compartirse la información obtenida por un aparato de medición con otros observadores usando canales clásicos de comunicación. Este problema toca directamente uno de los puntos esenciales del pensamiento de Bohr: la necesidad del lenguaje clásico para comunicar los resultados de una medición. Bohr había insistido en que, aunque la naturaleza fuera cuántica, las condiciones de posibilidad de la experiencia —la objetividad y la intersubjetividad— requerían el uso de conceptos clásicos. Lo que Zurek y Streltsov hacen es reformular este argumento en términos precisos dentro del marco de la teoría de la información cuántica. Demuestran que si el aparato de medición está en un estado cuántico no clásico —es decir, que presenta discordancia cuántica con el sistema observado—, entonces la información sobre el resultado de la medición no puede ser compartida de forma perfecta con otros observadores mediante un canal clásico (Ibíd., p.2). Este resultado proporciona una validación operacional del planteamiento de Bohr: la necesidad de una representación “clásica” del aparato no debe entenderse como una imposición epistemológica arbitraria, sino como una condición física necesaria para la comunicabilidad de los resultados. Es decir, hay razones estructurales dentro de la teoría cuántica que explican por qué ciertas partes del sistema deben comportarse “como si” fueran clásicas para que se pueda producir el tipo de objetividad que Bohr defendía.

Sin embargo, Zurek no se detiene allí. En lugar de tomar esta conclusión como una reafirmación del dualismo bohriano, la interpreta como una oportunidad para superarlo. Si el entorno es capaz de seleccionar dinámicamente los estados que pueden compartir información clásica (a través de redundancia informacional y Darwinismo Cuántico), entonces la “clasicidad” no debe postularse desde fuera, sino que puede emerger como una propiedad derivada del propio formalismo cuántico (Ibíd., p.4).

Zurek et al. (2023) introducen un desarrollo nuevo y significativo respecto a la comprensión moderna del principio de complementariedad de Bohr. Este trabajo no se limita a reinterpretar las ideas de Bohr, sino que propone una actualización formal cuantitativa del principio derivada del formalismo en el lenguaje de la teoría cuántica de la información. En efecto, a diferencia de sus formulaciones previas, la complementariedad no es un principio interpretativo independiente, sino que puede entenderse como una consecuencia matemática del formalismo cuántico, bajo ciertas condiciones de preparación del estado cuántico.

3.2. La interpretación del estado relativo de Everett en la versión de Zurek

La “mecánica ondulatoria pura” propuesta por Everett en 1957 buscaba resolver el problema de la medida eliminando el colapso de la función de onda [Everett, 1957]. Distinguía entre el formalismo del *colapso* (von Neumann–Dirac) y la interpretación de Copenhague (Bohr), pero consideraba que ambas compartían un defecto estructural: la incapacidad de tratar coherentemente mediciones anidadas, como en el experimento del amigo de Wigner⁹. Everett ilustró estas limitaciones con una versión del escenario de Wigner, mostrando que la teoría estándar, al depender del colapso, resulta lógicamente inconsistente. En cambio, su mecánica ondulatoria pura asumía como operativa la relación autovalor–autovector y prescindía del colapso. Buscaba demostrar que, al incluir al observador como parte del sistema físico, la teoría podía reproducir las predicciones empíricas de la mecánica cuántica. El reto pasaba a ser explicar cómo surgen registros definidos y probabilidades sin introducir reducciones arbitrarias del estado.

La noción de *estados relativos* es central en la propuesta de Everett: no hay, en general, un estado absoluto para un subsistema, sino solo estados definidos en relación con el resto del sistema (Everett, 1957b, p. 317). Mediante *secciones transversales* del estado total del universo cuántico, Everett describe cómo, en cada término de la superposición, un observador aparece correlacionado con un estado definido del sistema. Aunque el estado global permanece en superposición, cada sección contiene componentes —o ramas— donde el observador registra un resultado específico. Así, la experiencia consciente se vincula a una rama concreta, y la realidad percibida corresponde a una sección donde hay coherencia entre el sistema y la memoria del observador. Esta construcción explica la emergencia de resultados definidos y la apariencia clásica sin recurrir al colapso.

No obstante, este enfoque enfrenta dos dificultades conceptuales. Primero, el *problema de la probabilidad*: justificar la regla de Born dentro de una evolución puramente unitaria, sin presuponerla, para evitar circularidad. Segundo, la *ambigüedad de la base*, que es tanto formal como ontológica: sin un mecanismo interno que seleccione una base preferente, no se explica por qué los resultados empíricos se manifiestan en una base concreta (como posición o espín) y no en cualquier otra. Esta indeterminación está en el núcleo del problema de la medida.

⁹ Ver apéndice.

Además, DeWitt argumentó que el vector de estado universal de Everett es demasiado rico estructuralmente para representar el mundo físico tal como lo experimentamos (Barrett y Byrne, 2012, pp. 203–231). Según esta lectura, la coexistencia de múltiples *ramas* no puede reducirse a una abstracción matemática: implica la realización efectiva de múltiples realidades. Así, la multiplicidad de descomposiciones posibles obliga —si se toma el formalismo literalmente— a aceptar una ontología de “muchos mundos”, no como opción interpretativa, sino como consecuencia necesaria de asumir que el vector de estado describe completamente la realidad física.

En respuesta a estas limitaciones, Zurek adoptó el marco de los estados relativos, pero introdujo elementos físicos ausentes en la formulación original, como la *decoherencia* y el Darwinismo Cuántico, con el fin de explicar la emergencia de la objetividad y avanzar hacia una derivación de las probabilidades cuánticas a partir de principios más fundamentales. De esta manera, Zurek otorga a la emergencia clásica una explicación dinámica y físicamente motivada.

Si enfocamos el análisis desde una perspectiva ontológica, Zurek realiza una reformulación profunda de la propuesta de Everett: el estado relativo deja de ser una simple correlación matemática y adquiere una realidad física determinada por la dinámica del entorno. La *decoherencia* y la *einselección* resuelven el problema de la base preferente, mientras que la experiencia del observador emerge de correlaciones estables entre su memoria y los *estados de puntero*. No obstante, Zurek evita asumir un compromiso ontológico pleno con la multiplicidad de mundos: aunque todas las ramas del estado cuántico global existen formalmente, solo algunas se vuelven *existentiales*, es decir, accesibles, registrables y compartidas por observadores.

4. Interpretación existencial y ontología

La interpretación existencial de la mecánica cuántica ofrece un enfoque híbrido que busca superar las limitaciones ontológicas de las interpretaciones tradicionales. Extendiendo la interpretación de Copenhague, asume una clasicidad emergente en lugar de postularla como dada y coincide con Everett en prescindir del colapso, pero sin comprometerse con la ontología de los muchos mundos. En su núcleo, propone que los estados cuánticos son *epiánticos*, es decir, combinan existencia e información, situándose en continuidad con la noción de estados relativos. Esta sección explora las implicaciones ontológicas de esta propuesta.

4.1. Buscando los “beables” de John Bell

En su formulación inicial de la interpretación existencial, Zurek sostenía que existe un único mundo cuántico, donde la evolución unitaria genera múltiples ramas del estado global, aunque solo una coincide con la experiencia concreta del observador. Las demás no constituyen realidades alternativas, sino formas de información potencial (Zurek, 2010, p. 179). Esta propuesta introduce una jerarquía ontológica entre ramas, privilegiando aquella asociada a la experiencia efectiva.

Zurek condensa esta posición en un lema y una condición: un estado existe si persiste o evoluciona de forma predecible a pesar del entorno (Zurek, 2008, p. 24), y se considera objetivamente existente solo si es accesible sin ser perturbado, permitiendo así un consenso intersubjetivo (Zurek, 2022, p. 91). No obstante, esta asimetría ontológica no resuelve completamente el *problema de los resultados definidos*. Según los teoremas de insolubilidad, la evolución unitaria no basta para explicar la aparición de un único resultado salvo que, en el caso del estado relativo, todas las ramas sean consideradas físicamente reales.

La superposición involucra al sistema, al observador y al universo entero, generando ramas independientes —o “mundos”— donde cada posibilidad se realiza por separado. La linealidad impide la interacción entre ellas y la *decoherencia* evita interferencias observables. Así, el problema se resuelve solo si se acepta que todos los resultados ocurren, salvo que se introduzca algún otro requisito, como el colapso, para seleccionar una de las ramas. De otra manera, el modelo se limitaría a “salvar los fenómenos» en lugar de explicar la realidad a nivel fundamental.

Desde sus primeros trabajos, Zurek ha evitado asumir plenamente las implicaciones ontológicas de considerar que la función de onda describe de forma completa el estado físico de un sistema y que su evolución es siempre lineal (Zurek, 2022, p. 8). Como alternativa, ha desarrollado en las primeras décadas del siglo XXI propuestas basadas en una concepción informacional del estado cuántico, considerando la información como un concepto ontológico reductivo de relaciones sin relata. Esta perspectiva, influida por un pragmatismo naturalizado y una epistemología darwinista, desplaza el énfasis ontológico hacia una visión funcional del estado cuántico centrada en “lo que hace” (Zurek, 2009, p. 9).

Tal vez, para cumplir funciones explicativas y estructurales dentro del programa de interpretación existencial, Zurek introduce el concepto de *extanton* como neologismo de “el existente o el que existe” (2022). El *extanton* es una entidad emergente compuesta por un núcleo cuántico y un *halo* (entorno) que constituyen los relata de la relación con el observador, donde la información sobre el núcleo se disemina redundante y

establemente¹⁰. Esta redundancia, clave del Darwinismo Cuántico, permite la percepción objetiva del núcleo, cuya información puede ser accedida sin perturbarlo.

El núcleo representa el componente ontológico: un sistema cuántico masivo que, por no estar aislado, no sigue una evolución unitaria. “El núcleo es de hecho cuántico [...] pero no está aislado [...] No se puede esperar que [...] siga una evolución cuántica unitaria” (Zurek, 2022, p. 87). Su estado, robusto frente a la *decoherencia*, se reduce a los estados de puntero, únicos accesibles empíricamente: “Solo los estados de puntero del núcleo del *extanton* pueden encontrarse” (p. 87). De ahí que Zurek afirme: “el núcleo es el objeto de interés de la física” (p. 88). Ejemplos de núcleos incluyen planetas o los punteros de los aparatos de medida (p. 88).

La única vía de acceso al estado del núcleo es a través del halo, típicamente un *fotohalo*: un campo de fotones que actúa como medio de comunicación y *decoherencia*: “El fotohalo es el canal principal a través del cual los observadores descubren el estado del núcleo” (Ibíd., p. 88). Este halo no posee autonomía ontológica¹¹, sino que cumple dos funciones clave: inducir *decoherencia* y transmitir información redundante, haciendo posible la emergencia de una realidad objetiva estable. Aunque activa, su interacción es débil, lo que preserva la dinámica del núcleo.

La distinción entre núcleo y halo es funcional y relacional, no ontológicamente fija o fundamental. Es decir, no hay una partición única y absoluta del mundo que determine siempre qué parte es el sistema (núcleo) y cuál es el entorno (halo), Zurek lo insinúa al señalar que la información se propaga desde el sistema al entorno de manera selectiva, dependiendo de la interacción. El *extanton* parece que no es una partición metafísica del mundo, sino una unidad de descripción emergente y funcional en la interfaz entre sistema, entorno y observador: separa funcionalmente el ser (núcleo) del saber (halo), siguiendo un ideal platónico: la información no modifica el sistema, solo lo representa. Esta separación es posible cuando el núcleo tiene masa suficiente como para que la emisión de fotones no altere significativamente su momento (p. 90). Así, el halo cumple su función sin retroacción significativa, y el núcleo “persiste como lo harían los estados clásicos—independientemente de lo que se sepa sobre ellos” (p. 92).

Según Zurek (p. 86), con las debidas reservas, el núcleo del *extanton* puede asumir el papel de *beable* en el sentido propuesto por John Bell: es el componente sustantivo de la teoría, aquello que es, más allá de la observación. El halo, en cambio, desempeña una función epistémica, operando como canal de acceso a la información sobre el núcleo. Esta estructura dual del *extanton* —un ente que existe y un medio que informa— permite restaurar la distinción entre ontología y epistemología (p. 89). Es en este sentido en el que afirmábamos que la introducción del *extanton*, como unidad de descripción emergente y funcional, pretende resolver la tensión ontoepistémica.

Zurek sitúa el *extanton* en el centro del proceso de selección inducida por el entorno y de redundancia informativa (Darwinismo Cuántico), estableciendo una red de relaciones entre el *núcleo*, el *halo* y el *observador* (p. 92).

A diferencia de la interpretación de Copenhague, que sitúa al observador fuera del sistema, Zurek lo concibe como un sistema cuántico-macroscópico, sujeto a *decoherencia* y regido por las mismas leyes que los objetos que observa. En consecuencia, aunque Zurek no lo formula de manera explícita, diversos pasajes de su obra sugieren (p. 92) que, si se respeta la estructura conceptual desarrollada hasta aquí, el observador puede ser comprendido como un *extanton*, cuyas capacidades sensoriales y cognitivas están sometidas a las mismas condiciones físicas que rigen el resto del sistema incluida la conciencia. Incluso la conciencia, entendida como procesamiento de información (p. 93).

La mente del observador solo puede estabilizar correlaciones con estados de puntero, limitando su experiencia a aquellos resultados que han resistido la *decoherencia*. Nunca accede a la superposición, sino únicamente a estados seleccionados y redundantes, lo que implica una pasividad observacional: no colapsa ni perturba el sistema al acceder a la información (p. 93). Solo las correlaciones entre los estados de puntero del sistema y los de la memoria del agente —ambos einseleccionados— pueden mantenerse estables.

La unicidad de la experiencia no proviene de un colapso físico, sino de la estructura relacional entre los *extantones* involucrados (núcleo, halo y observador). Esta visión redefine la realidad como algo que no está dado en sí, sino que emerge de las correlaciones accesibles y estabilizadas en el entorno. La existencia objetiva, en este marco, depende de la capacidad del entorno para generar consenso intersubjetivo entre múltiples observadores (p. 92).

4.2. El concepto de realidad y objetividad en la interpretación existencial

El concepto de realidad objetiva en Zurek alude al dominio clásico que habitamos: un entorno compartido, estable y accesible para múltiples observadores, en el que los sistemas exhiben propiedades

¹⁰ Zurek define una subcategoría específica: los *photoextantons* (p. 89). Estas entidades estructuradas consisten en un núcleo cuántico-macroscópico y su halo fotónico, que comunica el estado del núcleo sin afectarlo. (p. 89).

¹¹ El halo no tiene entidad propia: es parte de una estructura relacional, cuya unidad significativa es el *extanton*. El halo no se define aisladamente, sino como lo que acompaña al núcleo.

aparentemente bien definidas e independientes del acto de medición. Tradicionalmente considerada como un punto de partida dado por la física clásica, esta realidad es reinterpretada por el Darwinismo Cuántico como una construcción emergente, resultado de la interacción entre sistemas cuánticos y su entorno mediante procesos de *decoherencia* y redundancia informacional.

Zurek identifica tres condiciones fundamentales para que surja esta “apariencia clásica”: accesibilidad redundante, estabilidad frente a la *decoherencia* y acuerdo intersubjetivo. El entorno actúa como testigo, seleccionando y amplificando ciertos estados del sistema, de forma que la realidad objetiva “surge junto con —y como resultado de— la transferencia de información desde S hacia E” (p. 92).

Desde una perspectiva operativa, Zurek redefine la existencia objetiva: un estado existe objetivamente si puede ser descubierto sin perturbar el sistema (p. 91). Este criterio no presupone una ontología clásica, sino que se basa en la *accesibilidad no invasiva y repetible*, permitiendo reemplazar la noción clásica de realidad por una basada en la estabilidad informacional y la redundancia accesible. En consecuencia, la existencia objetiva no es absoluta, sino relativa a la estructura del entorno y a su capacidad de preservar y diseminar registros coherentes (p. 92).

Esta noción de existencia objetiva relativa supera la dicotomía entre realismo e instrumentalismo: no postula una realidad completamente independiente del observador, pero tampoco la reduce a una construcción subjetiva. En su lugar, plantea un criterio físico y operacional, donde la realidad observable emerge como consecuencia de la dinámica cuántica misma —especialmente mediante la *decoherencia*, la *einselección* y la redundancia informacional—, preservando así una forma coherente de realismo emergente.

Este es, por tanto, el sentido en el que Zurek y colaboradores entienden que el estado cuántico es “*epi-óntico*” como contracción de epistémico y óntico. Refiere a la naturaleza dual de los estados cuánticos: son al mismo tiempo una descripción de las propiedades accesibles del sistema (epistémico) y de lo que existe en él (ontológico). En este marco, el enfoque de Zurek entra en tensión con la concepción aristotélica tradicional. Para Aristóteles, la sustancia tiene un ser independiente del conocimiento que de ella tengamos: el ser de una cosa no depende de ser conocida. Sin embargo, en el planteamiento cuántico de Zurek, el estado cuántico no adquiere objetividad ontológica sin ser de algún modo conocido, específicamente a través de su interacción con el entorno. Según Zurek, en el marco cuántico, esta distinción clásica se disuelve: un estado epióntico no puede existir como una entidad objetiva sin ser conocido de alguna forma, lo cual solo ocurre a través del entorno (entrelazado con él). El conocimiento del estado lo define y le da existencia objetiva relativa gracias a su redundancia en el entorno (2022). Esta perspectiva está directamente relacionada con el lema de Wheeler (1990) “*It from bit*”, ya que la información es constitutiva de la existencia física.

En términos aristotélicos, esto podría interpretarse como una ontologización del accidente relacional: el «ser-conocido» —una relación epistémica— se convierte en constitutivo del ser del sistema, lo cual sería problemático dentro del marco clásico, donde las relaciones no son esenciales a la sustancia.

Por tanto, el concepto de estado epióntico disuelve la distinción aristotélica entre ontología y epistemología, planteando una metafísica cuántica en la que el ser depende estructuralmente del conocer, lo cual representa una ruptura radical con la tradición sustancialista clásica.

Parece más fácil entender el estado cuántico epióntico como una reconfiguración contemporánea de la relación entre objeto, conocimiento y existencia desde una perspectiva kantiana. En efecto, el planteamiento de Zurek puede interpretarse, aunque con muchas reservas¹², como una versión cuántica del idealismo trascendental kantiano, donde los objetos no existen como «cosas en sí», sino como fenómenos dados a una conciencia bajo ciertas condiciones de posibilidad. El carácter epióntico del estado cuántico —su naturaleza híbrida entre lo epistémico (lo que conocemos) y lo ontológico (lo que es)— puede verse como un eco del pensamiento kantiano¹³ en el que no hay ontología sin epistemología: el objeto de experiencia existe solo en la medida en que puede ser conocido bajo condiciones determinadas (en este caso, por su redundancia en el entorno). Lo novedoso aquí es que el entorno físico actúa como una especie de «sujeto trascendental distribuido»¹⁴, que permite que el estado cuántico adquiera objetividad a través de la *decoherencia* el darwinismo cuántico. Así pues, se establece una radicalización empírica de la tesis de que no hay objeto sin condición de conocimiento, y de que la noción de sustancia ya no remite a una entidad permanente en sí, sino a una función estructuradora de la experiencia físicamente mediada por el entorno.

¹² En Kant, la cosa *en sí* no es una entidad oculta tras el fenómeno, sino un límite del pensamiento: lo que existe independientemente de la experiencia pero no puede ser conocido. Así, fenómeno y cosa en sí no son objetos distintos, sino niveles distintos de accesibilidad a la realidad desde una razón finita.

¹³ No es de extrañar, encontramos también resonancias kantianas en la obra de Bohr (Rioja, 2017).

¹⁴ El término “distribuido” funciona aquí como una metáfora filosófica que indica que la función trascendental no reside en un sujeto individual, como en Kant, sino que se reparte físicamente en el entorno. Este entorno cumple un papel análogo al del sujeto trascendental, no como conciencia, sino como estructura que permite la aparición de objetos estables y compartidos en la experiencia.

4.3. Buscando claridad ontológica

En el debate actual sobre el problema de la medida en mecánica cuántica, predominan dos enfoques principales. Por un lado, están las propuestas que buscan resolver el problema ajustando ciertos supuestos interpretativos sin modificar el formalismo básico de la teoría. Por otro lado, existen enfoques alternativos que introducen variables adicionales o alteran la linealidad de la evolución descrita por la ecuación de Schrödinger (Maudlin, 1995; Myrvoyd, 2022).

Como hemos visto, en marco de la interpretación de los muchos mundos de Everett, se propone una reconceptualización profunda de la noción de propiedades físicas. En lugar de considerar que el estado cuántico global representa directamente las propiedades actuales de un sistema, Everett sugiere que estas deben entenderse en términos de estados relativos. Es decir, un sistema físico como un electrón no posee una única propiedad definida (e.g. *espín* $+1/2$ o *espín* $-1/2$) sino que manifiesta ambas propiedades¹⁵, cada una relativa a un conjunto complementario de condiciones físicas, como el estado del entorno o del dispositivo de medición (Everett, 1957; Wallace, 2012, p. 38).

Por tanto, la interpretación del estado relativo sugiere una ontología en la que las propiedades que en física clásica se considerarían mutuamente excluyentes son de hecho ambas instanciadas, pero cada una en relación a un estado particular del objeto. Así, el estado cuántico describe cómo esas propiedades se relacionan, no cuál es efectivamente actual. En esa estructura relacional, las propiedades relevantes se agrupan en conjuntos causalmente desconectados (Wallace, 2010), es decir, conjuntos de condiciones físicas dentro de los cuales existe interacción física ordinaria. Por ejemplo, una partícula incide en un aparato de medida que muestra una posición definida.

El aislamiento causal característico de las distintas ramas en la *interpretación de los muchos mundos* (MWI, por sus siglas en inglés) sugiere que cada conjunto de propiedades físicas da lugar a un mundo independiente, en el que se desarrolla una secuencia coherente y completa de eventos. Si, como propuso DeWitt (1970), se considera que esta multiplicidad implica una adición ontológica al formalismo cuántico, reaparece inevitablemente el problema de la medida: ¿qué proceso físico determina la ramificación?, ¿cuándo y dónde ocurre?

Las formulaciones contemporáneas de la MWI, como las propuestas por Wallace (2012) y Vaidman (2019), abordan este problema de un modo diferente. En lugar de buscar un mecanismo que seleccione un resultado único entre las posibilidades, estas interpretaciones niegan que tal selección tenga lugar. Por ejemplo, en el escenario del gato de Schrödinger en la versión del amigo de Wigner, existiría una rama en la que el átomo radiactivo se desintegra, el gato muere y el amigo de Wigner observa al gato muerto; y otra en la que no se desintegra, el gato sobrevive y es observado vivo. En consecuencia, el problema de la medida no se resuelve en sentido tradicional, sino que se disuelve al rechazar la necesidad de un resultado único.

Según esta perspectiva, la evolución unitaria de la función de onda universal da lugar a una multiplicidad de ramas o mundos macroscópicos decoherentes, todos igualmente reales desde el punto de vista ontológico. Cada uno de estos mundos despliega, en el espacio físico tridimensional, un conjunto propio de interacciones causales coherentes. Así, aunque todos los mundos coexisten en el formalismo global, cada observador experimenta solo uno, dentro del cual las propiedades observadas están claramente definidas y organizadas en una historia causal consistente. Para Wallace (2012, p. 38) los mundos no son entidades fundamentales, sino estructuras emergentes dentro de la función de onda global. Estas estructuras se vuelven efectivamente autónomas cuando la interacción entre ramas es despreciable. En este sentido, los mundos actúan como patrones cuasi-clásicos, donde las entidades poseen propiedades definidas y evolucionan según dinámicas causales bien determinadas.

Veamos ahora cómo la interpretación existencial plantea la solución al problema de la medida y las cuestiones relativas a la ontología que suscita. En principio, Zurek y sus colaboradores parecen asumir que la teoría cuántica es formalmente completa, siguiendo así la línea de Everett. No obstante, la introducción del concepto de *extanton* sugiere que la función de onda no es suficiente por sí sola para explicar la realidad tal como la experimentamos.

En efecto, el núcleo del *extanton* es definido como el “objeto de interés” de la física (Zurek, 2022, p. 88) y constituye la fuente primaria de información (p. 92). Según Zurek, “en última instancia, solo estos núcleos cuentan como elementos de nuestra realidad cotidiana. Sin embargo, son los halos los responsables de la supresión de las superposiciones cuánticas y de nuestra percepción del mundo clásico—robusto y objetivo.” (p. 92) Esto indica que, junto con la función de onda, tanto núcleos como halos participan en la construcción ontológica de la realidad, aunque Zurek no los considera entidades fundamentales independientes en sentido estricto.

Sin embargo, como reconoce el propio Zurek (2022, p. 86), ni los núcleos ni los *extantones* cumplen plenamente con el criterio de beables formulado por John Bell, para quien constituyen los elementos ontológicos de la teoría, variables reales, que pueden estar asociadas a regiones del espacio-tiempo (e.g. la posición

¹⁵ La cuestión importante es cómo, dónde y cuándo se produce tal manifestación.

de una partícula, un campo, etc.), es decir, los *beables* deben existir localmente independientemente de cualquier medición o consciencia (Bell, 1990, p.90). Con otras palabras, desde el punto de vista ontológico, la relación entre lo que sea la materia y el espaciotiempo no es independiente. Por esta razón, sería conveniente que la interpretación existencial fijara con claridad la relación entre los “beables” propuestos por Zurek y el espacio físico y matemático.

Para Zurek, tampoco el estado cuántico universal representado por la función de onda universal puede ser objetivo, ya que, el universo no tiene un entorno externo, que lo convierta en accesible a la manera clásica. Entonces, no puede adquirir objetividad, y, en consecuencia, no se puede tratar como una entidad real sino como una idealización—a la manera del espacio y el tiempo absolutos en la física clásica—. En definitiva, asumir la existencia objetiva del vector de estado universal, es propio de una concepción demasiado clásica para Zurek (Ibíd. 97).

Ahora bien, (*pace Zurek*) el estado cuántico universal en la interpretación existencial no puede ser exclusivamente una herramienta para calcular probabilidades o una descripción de nuestro conocimiento incompleto del sistema, pues participa activamente en procesos objetivos como los de *decoherencia* o el Darwinismo Cuántico. Esto significa que no puede tener un estatus meramente epistémico. La cuestión es que el estado representado por la función de onda del universo es clave para definir la estructura de ramificación¹⁶ que está determinada por los términos cruzados y que da lugar a los posibles resultados de las correlaciones entre los estados puntero de los sistemas observados y los estados puntero equivalentes en la memoria del agente. Con otras palabras, una *sección transversal* del estado cuántico total es un subconjunto *coherente* del vector de estado global, donde se establecen correlaciones definidas entre un observador y el sistema. Aunque el estado completo sigue en superposición, cada sección corresponde a una rama en la que se registra un resultado específico, permitiendo explicar la experiencia consciente sin recurrir al colapso. Si no se atribuye la misma realidad a todas las ramas, ¿cómo se resuelve el problema de la medida? ¿cómo se selecciona la rama? La solución al problema de la medida queda desplazada a la selección de la rama donde se da de facto la solución única definida.

La clave para resolver este problema reside en introducir de manera subrepticia el proceso de colapso como se deriva de la siguiente afirmación de Zurek: “Las observaciones reinician el estado del Universo: reajustan las condiciones iniciales relevantes para el futuro del observador que conserva el registro de su resultado. El resto del vector de estado se vuelve inaccesible.” (Ibíd. p.97). La cuestión fundamental para resolver el problema de la medida es que, aunque no sean accesibles, tienen el mismo estatuto ontológico. Si lo que insinúa Zurek con el reseteo del estado del universo es que hay una asimetría ontológica entre ramas, parece que introduce la solución tradicional desde la interpretación ortodoxa -dos dinámicas una lineal, determinista y reversible y otra no lineal, indeterminista e irreversible- pero, entonces: ¿qué califica exactamente a algunos sistemas físicos para desempeñar el papel de “medidor”? (Bell, 2004, p.216). Si las observaciones resetean el estado del universo ¿cuándo y dónde se produce ese reseteo? ¿en la mente del observador? Si es así, ¿es necesario suponer un dualismo ontológico físico-mental? Es decir, si hemos interpretado bien a Zurek, debe elegir entre optar por un modelo de colapso o comprometerse con la multiplicidad de soluciones.

Desde el punto de vista ontológico, la interpretación existencial parece operar con una ontología de tres niveles: (1) un nivel cuántico-relacional potencial (estado cuántico, núcleos y halo), (2) un nivel intermedio no puramente cuántico ni plenamente clásico: *cuasi-clásico*. Se trata de un nivel en el que: el sistema ya ha perdido su “cuantidad” interna (por ejemplo, la coherencia entre sus estados ha desaparecido), pero aún no ha alcanzado la objetividad clásica, es decir, no existe consenso intersubjetivo sobre su realidad (Ibíd., p.9) y (3) un nivel clásico-objetivo relacional emergente, en el que la relación entre los *extantones*, sistema y observadores, fruto del sistema de correlaciones establecidas entre los estados puntero y los equivalentes de memoria la memoria del agente gracias a la mediación de sus respectivos entornos, generan una realidad efectiva accesible, robusta y compartida (2025, p.308).

Así descrito, el nivel ontológico intermedio es como un “fantasma ontológico”: ya no es pura posibilidad cuántica, pero aún no es un hecho objetivo. De esta manera, Zurek restablece la frontera difusa entre el mundo cuántico y el clásico.

Una cuestión fundamental en el análisis del marco teórico propuesto por Zurek es la caracterización espaciotemporal de los niveles de descripción implicados. En particular, interesa esclarecer qué tipo de localización y estructura espacio-temporal puede atribuirse a los dos primeros niveles, se formulan inicialmente en términos del formalismo matemático de la mecánica cuántica, es decir, como vectores en espacios de Hilbert y operadores unitarios que gobiernan su dinámica. Este formalismo no implica a priori una localización en un espacio-tiempo físico tridimensional, sino que opera en una estructura abstracta, de carácter matemático, que puede o no tener una representación geométrica ordinaria.

En definitiva, si abordamos el problema de la medida desde una perspectiva ontológica preguntándonos sobre la naturaleza del estado cuántico, qué “existe” antes y después del resultado de una medición, y cuál

¹⁶ Junto a los extantones (2025, p.299).

es el estatuto ontológico del observador, del aparato y del resultado, la interpretación existencial no adquiere un compromiso ontológico definido. Si todo el proceso es puramente operacional y, especialmente, si la ramificación se produce en términos operacionales de accesibilidad informativa, en la que no se especifique por qué se accede a una de las ramas y no a las demás, entonces la interpretación existencial se aproximaría o a aquellos enfoques que introducen el colapso o a los que utilizan la estructura del espacio de Hilbert para restringir las predicciones posibles y consideran innecesario resolver el problema de la medición. En definitiva, tratan a la función de onda como una herramienta para representar las expectativas del agente, más que como una descripción física de la realidad. Este tipo de enfoques suelen ser vistos como instrumentalistas.

No parece que este sea el enfoque que Zurek y sus colaboradores buscan seguir, ya que se definen como realistas en el sentido de que sostienen la existencia de una realidad última independiente del sujeto cognoscente (Ibíd., p. 71). No obstante, esta postura no se formula explícitamente dentro del marco del debate filosófico sobre el realismo científico. Las explicaciones basadas en los principios de la mecánica cuántica, como la del estado relativo de Everett, ofrecen una justificación estructural y Zurek parece querer explicar detalladamente los mecanismos que dan lugar al fenómeno emergente clásico desde el mundo cuántico pero sin comprometerse ontológicamente con la función de onda universal, sin aclarar el estatuto ontológico del extanton ni el marco espaciotemporal de los procesos implicados.

Si el Darwinismo Cuántico y la interpretación existencial desean aportar una explicación a nivel más fundamental, deben tomar compromisos ontológicos más claros: (1) ¿dónde ocurre la física?, es decir, ¿cuál es la relación entre el espacio físico de nuestra experiencia ordinaria y el espacio de configuración matemático donde se despliega la función de onda?; y (2) cómo pueden los conceptos de núcleo y halo dar respuesta a la inquietud de John Bell, quien sostenía que una teoría física objetiva debe especificar entidades que existan localmente en el espacio-tiempo.

El espacio en el que evoluciona la función de onda es el *espacio de configuración*, cuya dimensionalidad crece con el número de partículas ($3N$). Para una sola partícula puede identificarse con el espacio físico ordinario, pero en sistemas con múltiples componentes entrelazados esto ya no es posible, ya que la función de onda no se separa en funciones individuales. En estos casos, el estado global contiene más información que la suma de sus partes.

Las propuestas contemporáneas de los múltiples mundos intentan recobrar el marco clásico tridimensional de manera muy abstracta, acudiendo al concepto de emergencia de patrones en un marco funcionalista donde la legitimidad de considerar un patrón como una entidad real depende de cuán útil, potente y confiable sea la teoría que lo incorpora en su marco ontológico¹⁷.

También en el marco de la interpretación de los muchos mundos, Allori et al. (2011, p. 7), proponen la existencia de una distribución de masa en el espacio físico que se bifurca junto con la función de onda durante un proceso de ramificación. Cada rama da lugar a una configuración distinta de la distribución de masa, correspondiente a un resultado posible del experimento. Estas distribuciones coexisten en el mismo espacio tridimensional pero son mutuamente transparentes: no interactúan ni se afectan causalmente entre sí. Esta propuesta busca ofrecer una ontología en el espacio físico ordinario, en la que las múltiples ramas de la función de onda se reflejan como estructuras materiales superpuestas pero dinámicamente independientes.

De una manera parecida, la interpretación existencial introduce los conceptos de núcleo y halo, tal vez podrían jugar el mismo papel que la densidad de masa.

En suma, consideramos que tanto el Darwinismo Cuántico como la interpretación existencial deben avanzar hacia una postura ontológicamente robusta, clarificando la naturaleza del estado cuántico y precisando el papel del núcleo y el halo en su relación con el espacio de configuración y el espacio tridimensional ordinario. Sin un compromiso ontológico explícito, estas propuestas corren el riesgo de limitarse a una mera reconstrucción fenomenológica. Si el objetivo es ofrecer una explicación de la realidad en su nivel más fundamental —y no simplemente salvar los fenómenos observables—, se hace imprescindible comprometerse con una ontología clara, coherente y profundamente articulada.

5. Discusión y conclusiones

Este trabajo ha examinado críticamente los fundamentos del Darwinismo Cuántico y la interpretación existencial, con el fin de valorar su capacidad para ofrecer una explicación ontológicamente sólida de la emergencia del mundo clásico a partir de la dinámica cuántica. El análisis se ha centrado en el estatuto del estado cuántico, el papel del entorno como canal informativo y la función de entidades emergentes como el *extanton* en la construcción de una realidad objetiva y compartida.

La interpretación existencial plantea una ontología estratificada en tres niveles: uno cuántico-relacional potencial, uno cuasi-clásico intermedio, y otro clásico-objetivo emergente. En este marco, el “ser-conocido” adquiere relevancia ontológica, desplazando la noción clásica de sustancia. El carácter epióntico del estado cuántico —con implicaciones tanto epistémicas como ontológicas— puede entenderse como una

¹⁷ Criterio de Dennett (1991) (apud., Wallace, 2012, p.50)

reformulación libre del idealismo trascendental kantiano, la existencia objetiva depende de condiciones como la redundancia informacional y la selección ambiental, con el halo como “sujeto transcendental distribuido”. Sin duda, la propuesta de Zurek y colaboradores representa una profundización y, al mismo tiempo, una actualización de las ideas defendidas por Bohr. Su concepción de que las observaciones “resetean” el estado del universo introduce una dinámica que recuerda al colapso epistémico planteado por el físico danés, aunque formulada en términos contemporáneos y con un mayor énfasis en la información y la decoherencia.

Dentro del debate sobre las interpretaciones realistas de la mecánica cuántica, la interpretación existencial es claramente de corte instrumentalista, aunque introduce los extantones como entidades “existentes” no puede considerarse una interpretación de variables ocultas, pues no son entidades en el espacio-tiempo físico. Tampoco propone una multiplicidad de resultados como las interpretaciones de múltiples mundos, pues admite el colapso, aunque de forma implícita e incluso de manera contradictoria¹⁸. En todo caso, el colapso está relacionado con el estado de conocimiento del agente, lo que aproxima esta interpretación a las instrumentalistas de corte informacional naturalizado como el bayesianismo cuántico, aunque la propuesta de Zurek nos parece mucho más clarificadora y comprometida porque explora en profundidad el límite cuántico-clásico.

En el debate sobre el realismo, Zurek y sus colaboradores adoptan una postura de realismo ontológico: afirman la existencia de un mundo independiente del observador, parcialmente cognoscible, aunque limitado a lo observable. No parece que sostengan que la realidad sea independiente de la acción o el pensamiento humano, contra la visión del realismo científico. Parece más bien que las entidades dependen de un esquema. Al mismo tiempo, exhiben una inclinación instrumentalista de corte pragmatista, donde los estados son definidos por su función. Esta propuesta podría adecuarse, con las reservas pertinentes, al nuevo realismo neokantiano de corte pragmatista de Michela Massimi, pues en ambos modelos aceptan que la realidad se nos presenta bajo condiciones epistémicas estructuradas y la “objetividad” es una propiedad emergente de relaciones observacionales y prácticas, no un atributo absoluto, con validez intersubjetiva dentro de marcos epistémicos concretos (Massimi, 2022).

La propuesta de Zurek y colaboradores invita a repensar la ontología cuántica desde una metafísica de relaciones, sin negar lo que relata, pero reconociendo el carácter constitutivo de las interacciones. Al mismo tiempo, expresamos reservas frente a interpretaciones puramente epistémicas, pues al participar activamente en procesos físicos, el estado cuántico adquiere un papel estructural en la ramificación de mundos posibles. No obstante, si no se otorga realidad a todas las ramas, el problema de la medida persiste y la solución dada por Zurek nos sigue pareciendo insuficiente desde un realismo de corte tradicional.

En definitiva, el programa de Zurek representa un esfuerzo sobresaliente y sofisticado por derivar la experiencia clásica desde el mundo cuántico bajo el marco interpretativo bohriano con las nuevas odres de la decoherencia y el darwinismo cuántico. No obstante, el estado epióntico y el extanton no constituyen una ontología completa y clara de la realidad. Su relación parece puramente formal, pues el proceso relacional no distingue claramente el espacio de configuración y el espacio físico.

6. Referencias bibliográficas

- Allori, V., Goldstein, S., Tumulka, R. y Zanghì, N. (2011): “Many-Worlds and Schrödinger’s First Quantum Theory”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 62(1), pp. 1–27. DOI: [10.1093/bjps/axp053](https://doi.org/10.1093/bjps/axp053).
- Barrett, J. A. y Byrne, P. (2012): “Everett’s ‘Relative-State’ Formulation of Quantum Mechanics”, en R. Batterman (ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*, Oxford, Oxford University Press, pp. 215–286.
- Bell, J. S. (1990): “Lo explicable y lo inexplicable en la mecánica cuántica”. Alianza Editorial.
- Bell, J. S. (2004): *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815676>
- Everett, H. (1957): “‘Relative State’ Formulation of Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics*, 29(3), pp. 454–462. DOI: 10.1103/RevModPhys.29.454.
- Fine, A. (1993): “Measurement and Quantum Silence”, en S. French y H. Kamminga (eds.), *Correspondence, Invariance and Heuristics: Essays in Honour of Heinz Post*, Dordrecht, Kluwer, pp. 279–294.
- Massimi, M. (2022): *Perspectival realism*. Oxford University Press.
- Maudlin, T. (1995): “Three Measurement Problems”, *Topoi*, 14(1), pp. 7–15. DOI: 10.1007/BF00763473. SpringerLink+3PhilPapers+3SCIRP+3
- Rioja, L. (2017): “Niels Bohr and the Philosophy of Physics: Twenty-first-century Perspectives”, *International Studies in the Philosophy of Science*, 31(4), pp. 429–432. DOI: 10.1080/02698595.2019.1565209. PhilPapers+3Academia+3Portal de Periódicos da CAPES+3

¹⁸ En unos lugares admite que “el colapso es consecuencia de la no selección” y en otros que “no hay colapso literal” (2025, 307; 319).

- Saunders, S., Barrett, J. A., Kent, A. y Wallace, D. (eds.) (2010): *Many Worlds? Everett, Quantum Theory & Reality*, Oxford, Oxford University Press. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780199560561.001.0001. ResearchGate+1Oxford Academic+1
- Schlosshauer, M. (2007): *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition*, Berlín, Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-35775-9.
- Streltsov, A. & Zurek, W. H. (2013): "Quantum Discord Cannot Be Shared", *Physical Review Letters*, 111, 040401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.040401.
- Wallace, D. (2012): *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation*, Oxford, Oxford University Press.
- Zurek, W. H. (1993): "Preferred States, Predictability, Classicality and the Environment-Induced Decoherence", *Progress of Theoretical Physics*, 89(2), pp. 281–312. DOI: 10.1143/PTP/89.2.281.
- Zurek, W. H. (2002): Decoherence and the transition from quantum to classical—Revisited. *Los Alamos Science*, 27, 2–25. Disponible en: <https://www.lanl.gov/science/25th/decoherence.pdf>
- Zurek, W. H. (2003): Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Reviews of Modern Physics*, 75(3), 715–775. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.715>
- Zurek, W. H. (2007): Relative states and the environment: Einselection, enviance, quantum Darwinism, and the existential interpretation. *arXiv:0707.2832v1* [quant-ph]. <https://arxiv.org/abs/0707.2832>
- Zurek, W. H. (2009): Quantum Darwinism. *Nature Physics*, 5(3), 181–188. <https://doi.org/10.1038/nphys1202>
- Zurek, W. H. (2010): Quantum jumps, Born's rule, and objective reality. En S. Saunders et al. (Eds.), *Many worlds? Everett, quantum theory & reality* (pp. 416–432). Oxford University Press.
- Zurek, W. H. (2022): Quantum theory of the classical: Einselection, enviance, quantum Darwinism and extantons. *Entropy*, 24(11), 1520. <https://doi.org/10.3390/e24111520>
- Zurek, W. H. (2025). *Decoherence and quantum Darwinism: From quantum foundations to classical reality*. Cambridge University Press.

7. Apéndice

Este apéndice presenta una descripción técnica complementaria que no pretende una exposición profunda y completa; solo una guía para fijar matemáticamente algunos de los conceptos más importantes que sirven de base a la interpretación existencial de Zurek. Su propósito es ofrecer al lector una comprensión más precisa de los fundamentos matemáticos y físicos sobre los que se apoya la discusión filosófica desarrollada en el cuerpo principal del artículo. Para profundizar en las cuestiones técnicas consultar (Zurek, 2025) y (Schlosshauer 2007).

El problema de la medida

En un sistema compuesto por un sistema S y un aparato A, si S está en un estado propio $|s_1\rangle$ o $|s_2\rangle$ (con $\{|s_1\rangle; |s_2\rangle\} \in HS$), la evolución unitaria produce un correlato claro entre sistema y puntero $\{|\uparrow\rangle; |\downarrow\rangle\} \in HA$. Pero si S se prepara en superposición $|s\rangle = a|s_1\rangle + b|s_2\rangle$ ($|s\rangle \in HS$), la evolución lineal y unitaria da lugar a un estado entrelazado $a|s_1\rangle|\uparrow\rangle + b|s_2\rangle|\downarrow\rangle$, que no es un autoestado del observable del aparato y cuya interpretación es problemática. Aun así, se pueden asignar probabilidades según la Regla de Born: $P(\uparrow) = |a|^2$, $P(\downarrow) = |b|^2$.

El problema de la medida en el escenario del amigo de Wigner

El problema del anidamiento en el escenario del amigo de Wigner surge al considerar que tanto el sistema observado como el observador y su laboratorio forman parte de una superposición mayor. Mientras el amigo ve un resultado definido, Wigner describe todo el conjunto como aún en superposición, lo que genera una tensión entre descripciones internas y externas de un mismo proceso físico.

Si $|s\rangle$ el estado del material radiactivo, $|s_1\rangle$ representa la no desintegración y $|s_2\rangle$ la desintegración; $|gato\rangle$ estado del gato con $|gato_v\rangle$ vivo y $|gato_m\rangle$ muerto; el estado del amigo de Wigner $|Av\rangle$ ve gato vivo y $|Am\rangle$ ve gato muerto, etc. La teoría cuántica formula la interacción y la evolución unitaria del conjunto $U \rightarrow$, que conduce al entrelazamiento según los tres principios cuánticos: $|s\rangle \otimes |gato\rangle \otimes |A\rangle \rightarrow |\psi(t)\rangle = a|s_1\rangle|gato_v\rangle|Av\rangle + b|s_2\rangle|gato_m\rangle|Am\rangle + \dots$

Se produce pues un anidamiento que la interpretación tradicional hace colapsar a uno de los dos términos con la medida y que la interpretación del estado relativo resuelve admitiendo la multiplicidad de las ramas.

Formalismo de decoherencia simplificado

En la interacción entre el sistema bajo estudio y el aparato de medida, al introducir el ambiente que los rodea E, representado inicialmente por $|\varepsilon_0\rangle$ (con $\{|\varepsilon_1\rangle; |\varepsilon_2\rangle\} \in H_\varepsilon$) la interacción unitaria genera un estado totalmente entrelazado:

$$\psi(t) = a|s_1; \uparrow\rangle |\varepsilon_1\rangle + b|s_2; \downarrow\rangle |\varepsilon_2\rangle$$

El operador densidad asociado incluye términos cruzados (interferencias) $\rho^{\wedge}_{SE}(t) = |\psi(t)\rangle\langle\psi(t)| \rightarrow |I|/2 + |I|/2$ $2/I/2$. La *decoherencia* tiene lugar cuando estos términos tienden a cero por pérdida de coherencia de fase en el entorno. Al modelar E con infinitos grados de libertad, y bajo ciertas condiciones del Hamiltoniano, se cumple que los solapamientos

$|\Psi\rangle \rightarrow |s_i\rangle e^{-i\theta(t)} |e_i\rangle \rightarrow |s_i\rangle |e_i(t)\rangle$ y $\rightarrow 0$, tienden a cero diluyendo el término interferencial.

El estado resultante: $\rho^{\wedge}_{SE}(t) \rightarrow \rho^{\wedge}_{sred}(t) = |a|^2 |s_1\rangle\langle s_1| + |b|^2 |s_2\rangle\langle s_2|$

es una mezcla impropia que es aparentemente clásica, aunque siguen presentes los solapamientos diseminados en el entorno cuya complejidad los convierte en casi inaccesibles.

Einselección y el tamiz de predictibilidad

El mecanismo de decoherencia no asegura la selección de los estados preferentes pues en presencia de degeneración muestra hipersensibilidad a las condiciones iniciales (entre dos estados muy próximos), falta de unicidad (la descomposición de Schmidt no es única) y, por último, sufre dependencia de los autoestados con el tiempo. Por esta razón Zurek (1993, p. 294) propone el *tamiz de predictibilidad* para jerarquizar estados cuánticos según su resistencia a la *decoherencia*. Se seleccionan como *estados puntero* aquellos que maximizan la pureza ($\text{Tr } \rho^2$) o minimizan la entropía de von Neumann. Aunque rara vez son completamente puros, los más cercanos a $\text{Tr } \rho^2 = 1$ representan configuraciones cuasi-clásicas. Una ortogonalidad aproximada basta para la emergencia de propiedades observables.

Información mutua cuántica

La información mutua cuántica¹⁹ $I(S:E) = S(S) + S(E) - S(SE)$, con S entropía de von Neumann $S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log_2 \rho)$, con $S(\rho_{\text{puro}}) = 0$, mide la correlación total entre sistema y entorno. Permite calcular la redundancia informativa: $R = I(S:F)/H(S)$, donde F es un fragmento del entorno, I la información transferida, y I(S) la entropía del sistema (Zurek, 2009, p. 3). Fragmentos redundantes garantizan accesibilidad objetiva sin perturbar el sistema, pues pueden ser medidos de manera independiente.

La discordancia cuántica

La discordancia cuántica se define como la diferencia entre dos expresiones de la información mutua que coinciden en el caso clásico, pero divergen en el caso cuántico:

$$\delta(A|B) = I(A:B) - J(A|B)$$

Donde $I(A:B)$ representa la Información mutua cuántica total entre los subsistemas A y B y $J(A|B)$ las correlaciones clásicas, definidas a partir de una medición local sobre B. Zurek interpreta la discordancia cuántica como un índice de cuán perturbador resulta observar un sistema cuántico, es decir, cuánta información se pierde o se altera al intentar obtener información clásica mediante mediciones: mide la cantidad de información cuántica que no puede extraerse sin perturbar el sistema. Esto es fundamental para entender por qué no toda la información en sistemas cuánticos se puede recuperar mediante observaciones locales clásicas.

¹⁹ La entropía conjunta cuántica de un sistema cuántico bipartito cuyo estado viene representado por el operador densidad ρ_{AE} se define como: $S(S, E) = S(\rho_{SE}) = -\text{Tr}(\rho_{SE} \log \rho_{SE})$ mayor igual que \cdot . En el caso de que el estado bipartito sea puro, como sabemos: $S(\rho_{SE}) = \cdot$ y las entropías de cada subsistema son $S(S) = S(E)$. Si el estado conjunto es separable, es decir, si no hay entrelazamiento entre los subsistemas, $S(\rho_{SE}) = S(\rho_S) + S(\rho_E)$.