



La estructura del Universo y la Mecánica Cuántica

The Universe's Structure and Quantum Mechanics

A estrutura do Universo e a Mecânica Quântica

Daniel Sudarsky

Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México
 sudarsky@nucleares.unam.mx

0000-0003-3042-4982 

→ **Recibido:** 16/03/2026

→ **Aceptado:** 06/04/2026

→ **Publicado:** 11/09/2026

→ **Artículo Dossier II**

“Filosofía y Fundamentos de la Física”

© 2026 Daniel Sudarsky

CC BY 4.0

→ **Cómo citar:** Sudarsky, D. (2026). La estructura del Universo y la Mecánica Cuántica. *Culturas Científicas*, 7(1), pp.47–58. doi.org/10.35588/cc.v7d8353

[RESUMEN]

El presente trabajo aborda, desde un enfoque que quiere ser didáctico, los aspectos básicos de la cosmología contemporánea, que resulta incluir una de las situaciones en que los problemas conceptuales que afligen a la mecánica cuántica toman un cariz particularmente agudo. Se describen entonces las ideas fundamentales detrás de la cuántica, empezando por las más relevantes para su práctica cotidiana en el laboratorio pasando luego a concentrar la atención justamente en dichas dificultades conceptuales, que hacen que a pesar de sus incuestionables éxitos empíricos la teoría sea considerada por quienes se adentran en sus fundamentos como enfocándonos particularmente en el denominado problema de la medición o el problema "M" (como solemos designarlo para resaltar su importancia). Continuamos presentando brevemente el enfoque que nuestro grupo ha adoptado para enfrentar dichos problemas en sus aplicaciones a la física de agujeros negros y en la cosmología. Específicamente en el contexto cosmológico discutiremos en cierto detalle en el papel que se les adjudica a las fluctuaciones cuánticas de campo responsable de la inflación cósmica (un régimen temprano de altísima aceleración en la expansión cósmica) en el proceso de generación de las semillas primordiales de la estructura en el universo, mismas que dan lugar a cúmulos galácticos, galaxias, estrellas y en última instancia a las condiciones propicias para la evolución biológica y la aparición de seres humanos.

[PALABRAS CLAVES]

Cosmología, Mecánica Cuántica, Problema de la Medición, Fluctuaciones cuánticas, Emergencia de las semillas estructura cósmica.

[ABSTRACT]

This paper addresses, from a didactic perspective, the basic aspects of contemporary cosmology, which includes one of the situations in which the conceptual problems afflicting quantum mechanics take on a particularly acute character. The fundamental ideas behind quantum mechanics are described, beginning with those most relevant to its daily practice in the laboratory, and then focusing precisely on these conceptual difficulties, which, despite its undeniable empirical successes, lead those who delve into its foundations to consider the theory as particularly problematic, concretely we focus on the so-called measurement problem or the "M" problem (as we usually call it to highlight its importance). We then briefly present the approach that our group has adopted in order to address these problems in their applications to black hole physics and cosmology. Specifically, within the cosmological context, we will discuss in some detail, the role attributed to quantum fluctuations of the field responsible for cosmic inflation (an early epoch of highly accelerated cosmic expansion) in the process of generating the primordial seeds of structure in the universe. These seeds are believed to give rise to galactic clusters, galaxies, stars, and ultimately, the conditions conducive to biological evolution and the emergence of human beings.

[KEY WORDS]

Cosmology, Quantum Mechanics, Measurement Problem, Quantum Fluctuations, Emergence of the Seeds of Cosmic Structure

1. Introducción

Todo el mundo ha oído hablar del Big Bang como la teoría que describe el origen del Universo. Sin embargo, pocas personas saben que, en realidad, dicha teoría no explica el origen mismo, sino únicamente una etapa muy temprana de su evolución. No tenemos hoy una idea confiable sobre un “primer instante” real del cosmos. De lo que sí tenemos amplia certeza, gracias a observaciones sobre la expansión del Universo y a la teoría de la Relatividad General de Einstein —la cual ha superado todas las pruebas experimentales realizadas—, es que el Universo fue en el pasado mucho más denso y mucho más caliente. Disponemos incluso de datos que describen con gran precisión una época en que la temperatura y densidad eran tan elevadas (miles de grados Kelvin, denotados por K) que no existían átomos, sino únicamente electrones y núcleos atómicos libres. Del final de esa etapa, en el llamado “desacople”, cuando el Universo se enfrió lo suficiente para permitir la formación de átomos, conservamos una reliquia extraordinaria: los últimos fotones emitidos por la materia antes de combinarse en átomos. Estos fotones, estirados por la expansión cósmica, llegan hoy a nuestros detectores como radiación de microondas, correspondiente a una temperatura de 2.7 K. Este es el famoso fondo de radiación cósmica (CMB), que constituye, en cierto sentido, una fotografía del Universo temprano (Durrer, 2020). Estas, junto con otras observaciones, indican que el universo era en el pasado mucho más homogéneo e isotrópico. Si bien hoy tenemos variaciones de densidad enormes, con regiones ocupadas por cúmulos de galaxias y otras relativamente vacías (es decir, con variaciones relativas de densidad de orden uno) en la época de desacople las variaciones relativas de la densidad eran de una parte en cien mil.

Con el conocimiento de la física atómica, nuclear y de partículas, combinado con la Relatividad General, podemos retroceder aún más: cientos de miles de años antes del desacople. En esos tiempos, las temperaturas alcanzaban miles de millones de grados Kelvin, tan altas que ni siquiera protones y neutrones podían permanecer ligados. Al final de aquella etapa, durante la llamada “era de la nucleosíntesis”, se formaron los núcleos de los elementos más livianos: deuterio, helio, litio, entre otros. Los protones que no se combinaron pasaron a constituir los núcleos del hidrógeno ordinario. Estamos muy seguros de esta parte de la historia cósmica porque la física nuclear y de partículas permite calcular las proporciones en que debieron formarse estos núcleos, y las observaciones concuerdan de manera notable con estos cálculos: un triunfo central de la cosmología moderna. Sin embargo, nuestras teorías no pueden extenderse indefinidamente hacia el pasado. Cuando la temperatura se aproxima a la temperatura de Planck (alrededor de un 1 seguido de 32 ceros en grados Kelvin), nuestros conceptos de espacio y tiempo dejan de ser válidos. En esas condiciones, se espera que las colisiones entre partículas produzcan agujeros negros minúsculos que se evaporarían instantáneamente, generando algo parecido a una “ebullición” turbulenta del propio espacio-tiempo, un régimen que, de hecho, no sabemos cómo describir. Se trata de situaciones para las que se requeriría usar una teoría cuántica de la gravitación, —una descripción cuántica del espacio-tiempo— algo que simplemente no tenemos disponible (a pesar de heróicos esfuerzos de colegas que trabajan en sendos programas como la teoría de cuerdas, gravitación de Lazos, los Conjuntos Causales o triangulaciones dinámicas, entre otros). Durante los últimas décadas, este panorama ha sido modificado por una idea que explica algunas de las características más sorprendentes del Universo: su extrema planitud, homogeneidad e isotropía. Bajo condiciones normales, la curvatura espacial debería crecer con el tiempo, y la distribución de materia debería volverse menos uniforme. Para que hoy el Universo sea tan plano y tan homogéneo, debió serlo aún más en el pasado, en un grado difícil de justificar. La propuesta que aborda este problema es el modelo inflacionario. La idea

central es que, en una etapa muy temprana —posterior a la era de Planck pero anterior a la nucleosíntesis— el Universo experimentó una expansión extremadamente acelerada llamada inflación, impulsada por un campo escalar. Esta expansión vertiginosa aplanaría el Universo casi por completo, diluiría cualquier irregularidad y lo volvería prácticamente homogéneo e isotrópico. Durante mucho tiempo la inflación se consideró una especulación interesante, pero en años recientes ha pasado a formar parte esencial del modelo cosmológico estándar. Sin embargo, a primera vista parece enfrentar un problema serio: si la inflación produce un Universo totalmente homogéneo e isotrópico, ¿cómo explicar las variaciones de temperatura observadas en el fondo cósmico de microondas? Estas variaciones, del orden de una parte en cien mil, son muchísimo mayores que las predicciones ingenuas del modelo. Curiosamente, estas imperfecciones no solo no contradicen la teoría, sino que son esenciales: revelan la presencia de inhomogeneidades iniciales que, amplificadas por la gravedad, dieron origen a galaxias, cúmulos, estrellas, planetas e incluso la vida. Los detalles de estas fluctuaciones pueden analizarse descomponiendo su patrón en ondas de diferentes longitudes y direcciones, de manera análoga a como se describe el oleaje en la superficie de una alberca. Esta descomposición define el “espectro de fluctuaciones”, cuya forma el modelo inflacionario predice con notable precisión. Lo extraordinario es que, al incluir los efectos cuánticos del campo inflatón, el modelo permite predecir exactamente el espectro de inhomogeneidades, y estas predicciones concuerdan exquisitamente con las observaciones. Sin embargo, esta aparente perfección oculta un problema sutil pero profundo. Para comprenderlo debemos adentrarnos brevemente en la mecánica cuántica.

2. La Mecánica Cuántica

La física moderna concibe al mundo en su nivel más fundamental en términos de la cuántica. Pero ¿qué quiere decir esto? Sin adentrarnos en el aparataje matemático, que es un tanto complejo, podríamos decir que la modificación fundamental que introduce la física cuántica respecto a la física clásica (la que aprendemos en la escuela) corresponde a la asignación de atributos o caracterización de los estados de los objetos físicos. Solemos pensar, por ejemplo, que la posición o velocidad de una partícula, es como, la postura de una persona (arrodillado, sentado o parado). Es decir, es algo que, en un instante dado, refleja un aspecto de la condición de la persona, en contraste, a algo como la simpatía o amabilidad, que podríamos decir es más bien una característica, no de la persona en sí, sino de la interacción de ella con otros individuos. Bueno, pues de acuerdo a la física cuántica, todos los aspectos modificables de una partícula, son, en principio, algo más cercanos a la simpatía o la amabilidad: a veces ni siquiera se le puede atribuir dichas cualidades a una persona (imaginemos a Robinson Crusoe solo en la isla ¿se puede decir si en ese estado era o no simpático?). Pero cuidado con esta analogía ya que no es para nada exacta¹ El punto es que según la mecánica cuántica, en general, un sistema físico cualquiera, por ejemplo, una partícula, genéricamente, no tiene ni posición ni velocidad. Según las reglas de la cuántica, es mediante el proceso de medición, con el uso de un detector de velocidad o posición, que la partícula adquiere valores determinados para dichos atributos².

¹Solo pretende ilustrar el punto de que, algunos atributos a los que estamos acostumbrados, pueden, en ciertas situaciones, no estar bien definidos.

²Y que por otro lado, luego, en general los pierde de acuerdo a una ley fundamental que gobierna la evolución temporal de dichos sistemas, en la ausencia de mediciones, conocida como la ecuación de Shrödinger.

Para clarificar un poco la situación conviene describir brevemente, (y evitando las complejidades matemáticas) la estructura básica de la mecánica cuántica. En el marco de esta teoría los sistemas físicos se describen por ciertos objetos matemáticos relativamente abstractos llamados, dentro de este contexto, estados cuánticos, para los cuales se tienen dos leyes de evolución temporal. Una que es determinista e invertible³ conocida como la ecuación de Schrödinger y otra ley de evolución que reemplaza a la anterior en situaciones que involucran mediciones. Esta segunda ley tiene carácter probabilístico (de modo que no es ni determinista ni invertible). Una de las dificultades es que la teoría es bastante poco clara respecto a cuando ha de regir una u otra de las dos reglas de evolución. En otras palabras ¿qué exactamente cuenta como una medición?

A veces se intenta trivializar este asunto argumentando que se trata simplemente de que no sabemos con exactitud los valores de dichas cantidades, de manera que estaríamos sencillamente ante una limitación epistémica, y que se resuelve al considerar mediciones que al determinar los valores en cuestión revelan su realidad preexistente. Sin embargo, la cosa, como discutiremos seguidamente, no parece ser tan sencilla.

De hecho, un reciente resultado conocido como el teorema PBR (Pusey et al., 2012) descarta en un contexto bastante amplio la viabilidad de dicha postura. La lección es entonces que lo que dice la Teoría cuántica en su versión tradicional (puesto que hay propuestas diferentes que incluyen cosas como variables ocultas, en que se revisan algunas de estas consideraciones [ver por ejemplo Bohmian Mechanics (Bohm, 1952)]) es que los sistemas no suelen tener valores definidos de sus atributos.

Resumiendo, el estado genérico de un sistema físico cualquiera, como por ejemplo una partícula (pero no solo una partícula), se describe mediante un objeto llamado su función de onda⁴, que contiene información acerca de las probabilidades de que, al medir un cierto atributo (como la posición o la energía) de la partícula, dicho atributo tome alguno de sus valores posibles. Inmediatamente después de la medición, el estado del sistema cambia a un nuevo estado en que la cantidad medida si tiene un valor determinado, y concretamente el valor correspondiente a el resultado de la observación. A este cambio, se lo conoce como “el colapso” o “la reducción” de la función de onda.

La descripción detallada de este tipo de proceso, su significado, y la manera en que encaja en nuestra visión de la naturaleza, es uno de los aspectos más problemáticos de la teoría, y se le conoce como *el Problema de la Medición*. Yo he optado por denominarlo el problema M (*the M problem* en inglés) por la popularidad en ciertos ámbitos a usar la designación con M de asuntos de gran envergadura. A continuación me explayaré un poco para hacer más patente la extraña versión de la realidad a la que todo esto nos enfrenta.

Debajo de lo anteriormente mencionado subyacen aspectos que resultan verdaderamente sorprendentes. De hecho no es extraño encontrarnos en mecánica cuántica con estados altamente contra-intuitivos (entre los que se encuentra el del famoso gato de Schrödinger). Un ejemplo más sencillo y que aparece cotidianamente en nuestros laboratorios es el caso de una sola partícula cuya función de onda la localiza simultáneamente en dos o más regiones distantes entre sí. Si pensamos que la función de onda solo nos indica en donde podemos hallar a la

³Es decir, que dado el estado cuántico en un momento dado, dicha ley de evolución determina el estado cuántico en todo otro momento tanto en el pasado como en el futuro.

⁴O de manera más general, su estado cuántico.

partícula, esto no parece ser demasiado misterioso, particularmente si nos imaginamos que la partícula está en alguna de esas regiones y simplemente nosotros no sabemos cual de ellas es. Pero la cosa lamentablemente no es tan simple. Al parecer, y como lo demuestran experimentos como los llamados "de la doble rendija" (ver, por ejemplo (Bach et al., 2013)), bajo ciertas condiciones es necesario pensar que la partícula está, en cierto sentido, en los dos lugares a la vez.

¿Es esto raro?, ¡¡rarísimo!! Pero el asunto es que hasta hoy la física cuántica ha demostrado ser asombrosamente precisa y su utilización es necesaria para describir el comportamiento de la materia en las más diversas circunstancias: desde la estructura de los átomos y moléculas, hasta el funcionamiento de aparatos electrónicos, e incluso de aspectos del comportamiento de la materia a escala macroscópica, como en el caso de los superfluidos.

Pero sigamos adentrándonos en estas ideas poco usuales, o más bien contraintuitivas a que nos lleva la física contemporánea. Consideremos ahora la noción de incertidumbre. Dada una cantidad física, como la posición, la velocidad, la energía, al rango de valores para los cuales la función de onda asigna una probabilidad no despreciable, se lo llama la incertidumbre de dicha cantidad en el estado correspondiente. Mientras que al promedio ponderado de los valores de dicha cantidad se le conoce como el valor esperado de la cantidad en cuestión, y representa el promedio que esperamos obtener si el experimento y la medición se repiten un suficiente número de veces. Una caracterización de un estado genérico de una partícula, requiere entonces que especifiquemos, no solo los valores esperados de su posición y velocidad, sino también las incertidumbres y toda la demás información que codifica la función de onda.

El famoso principio de incertidumbre de Heisenberg, que refleja el aspecto por el que es más conocida esta teoría, indica por ejemplo, que el producto de la incertidumbre de la posición y la velocidad de una partícula, no puede nunca ser menor que un cierto número fijo que tiene que ver con una cantidad fundamental conocida como la constante de Planck, y la masa de la partícula (para partículas sin masa pasa algo similar pero un tanto más complejo).

Como ya mencionamos, es tentador, pensar que el asunto tiene que ver simplemente con el hecho de que nunca conocemos con total precisión, ningún atributo del objeto, por ejemplo, la posición y la velocidad de la partícula, tal vez por limitaciones de nuestros aparatos. El asunto es que la cosa es mucho más profunda que esto. Aparte del ya mencionado teorema PBR, múltiples análisis muestran que al pensar que los objetos tienen siempre unos valores determinados de sus atributos, y que simplemente no sabemos cuales son dichos valores, nos lleva a sacar conclusiones que están en contradicción no solo con la mecánica cuántica sino también con los experimentos. Por ejemplo, hay situaciones en las que sabemos exactamente cual es la energía, pero la posición y velocidad tiene grandes incertidumbres. Un ejemplo de esto lo da un átomo aislado en su estado de menor energía. En dicha situación el electrón no tiene una posición definida. Hay quienes usan para hablar de esta situación, una imagen alegórica en que se considera que el electrón está saltando de un lugar a otro, indicando que la posición del electrón es sujeta a fluctuaciones y, aunque no se dice explícitamente, se piensa en ellas como fluctuaciones estocásticas. Es importante notar que dichas caracterizaciones no se pueden tomar como algo más que alegóricas, pues suelen llevar a conclusiones erróneas. Por ejemplo, si consideramos que el electrón en su estado de mínima energía, que es un estado de energía bien definida, está saltando de un lado al otro, es difícil entender como puede tener una energía estrictamente constante. Lo apropiado es entonces indicar que en dicha situación, el electrón no tiene una posición a pesar de que su estado está totalmente determinado, y caracterizando la indefinición de su posición en términos de incertidumbre que evoca algo

menos inapropiado que el término “fluctuaciones”. Recientemente estudiamos el caso concreto de un experimento que logra llevar a cabo mediciones de una precisión tan alta, que resulta simplemente incompatible pensar, en ese caso, acerca de las incertidumbres cuánticas como si se tratara de fluctuaciones estocásticas (Guerrero et al., 2024)

Otro ejemplo, que nos será útil más adelante, es el de una clase de sistemas que se conocen genéricamente como “osciladores armónicos”, y que corresponden a una masa que se puede mover solo a lo largo de una recta, sobre la que actúa una fuerza, que como la de un resorte, aumenta proporcionalmente con el desplazamiento de la masa de cierto punto de equilibrio. Lo anterior es la descripción clásica del sistema, la cuántica nos lleva, evidentemente, a algo menos sencillo. Cuánticamente el estado de menor energía, o estado básico, que es el que más se asemeja al estado clásico de equilibrio con la masa en reposo y el resorte sin estirar, corresponde a una función de onda centrada en la posición de equilibrio y en el valor cero de la velocidad, pero con incertidumbres, determinados por el valor de la masa y el equivalente a la “dureza” del resorte. La función de onda de este estado, tiene una forma matemática que se llama Gaussiana y que se ve como una campana invertida centrada en el punto de equilibrio (y que en particular es simétrica respecto a dicho centro). Esto nos indica, entre otras cosas, que si medimos la posición de la masa, el valor más probable corresponde a la posición de equilibrio, pero que es posible encontrarla desplazada de este punto (rompiendo así la simetría bilateral arriba mencionada), con probabilidad que decrece a mediada que nos alejamos de él. En el caso del estado básico del oscilador armónico, las posiciones desplazadas del punto de equilibrio en una misma cantidad ya sea en una u otra dirección, tienen igual probabilidad. El estado es simétrico respecto a las dos direcciones, pero claro, al medir la posición obtendremos un desplazamiento en una dirección determinada, a menos que la posición final resulte ser la del punto de equilibrio.

¿Cómo es que todo esto encaja con las viejas nociones de física, que son la base de la física clásica, aquella que se estudia en la escuela? Según las visiones contemporáneas más difundidas, la física clásica, resultaría ser una aproximación, útil para describir el comportamiento de objetos, cuando los estudiamos con una precisión mucho menor que las incertidumbres mencionadas arriba. El mundo físico es fundamentalmente cuántico y su apariencia clásica es solo una ilusión, debida a que, en general, nuestros instrumentos de observación no son muy precisos. Sin embargo, es un hecho que a falta de resolución del problema M no podemos decir que realmente entendemos cómo es que emerge el mundo que describe la física clásica de un mundo que, a nivel fundamental, debería estar descrito en términos cuánticos.

3. Más sobre el problema M

El punto que nos interesa enfatizar acá es que la física cuántica, tiene un aspecto que resulta muy molesto en ciertos contextos, ya que al usarla debemos identificar a un ente externo, no descrito por la función de onda, que es el que consideramos se usa para llevar a cabo la medición. Es decir, tenemos que indicar cuando es que se está midiendo algún atributo al objeto cuántico en cuestión. ¿Podemos pensar que esto ocurre cuándo nuestro objeto físico interactúa con algún aparato? ¿No es acaso el aparato también un objeto físico igualmente susceptible a la descripción cuántica, por lo tanto no un ente externo? ¿Será que la medición solo ocurre cuando un ser humano observa el aparato de medición y extrae el resultado? ¿No pensamos acaso que todo ser vivo, incluyendo un ser humano, es también un ente físico, y por lo tanto

susceptible de ser descrito por la mecánica cuántica, y por ende no identificable como objeto externo? Este tipo de cuestiones es parte del problema de la medición que ya mencionamos y ha sido objeto de innumerables análisis por una gran cantidad de físicos teóricos. Análisis que continúan a la fecha y que propician los más álgidos debates. No quiero entrar en una discusión más detallada del asunto, puesto que se requeriría un libro más que un artículo, sino que me limito a enfatizar que se trata de un problema que se considera no totalmente resuelto, y, de hecho, si se indaga hasta que grado está éste parcialmente resuelto, la respuesta depende del físico al que se le pregunte. Sin embargo, lo que es importante resaltar es que en todos los análisis de las situaciones en que dicho problema se suele considerar se hacen referencias a efectos externos sobre el conjunto total de objetos participantes, que incluyen al sistema físico concreto, digamos el átomo, el dispositivo que se usa para llevar a cabo la medición, y hasta el observador que percibe el resultado. De modo que independientemente de lo satisfactorio o no que se puedan considerar dichos análisis, sus resultados no se pueden extrapolar a situaciones en que no es posible considerar dispositivos, observadores y efectos externos.

El problema, en su alcance más general, es frecuentemente considerado entre muchos físicos como “solo un problema de principio”, pues en la práctica, uno siempre (o casi siempre) sabe cuando se está produciendo una medición (como ejemplo de una clara excepción, ver el caso descrito como Mini Mott (ver la sección 3 de (Castagnino et al., 2017))). Claro, que de una teoría considerada como fundamental, uno esperaría que tuviera reglas absolutamente claras como para lidiar con cualquier situación concebible. En este momento, el problema de la medición es un obstáculo para poder considerar a la mecánica cuántica de esta manera.

Hay por lo tanto varios grupos de investigadores a nivel mundial que consideran modificaciones de la teoría cuántica, preservando los éxitos de la teoría establecida, pero incluyendo otros postulados de modo de que el problema de la medición se resuelva o desaparezca. Un resultado que resulta muy conveniente para organizar conceptualmente los caminos para enfrentar el problema de la medición es el *trilema de Maudlin* (Maudlin, 1995) que demuestra la imposibilidad de mantener simultáneamente tres posturas, que reflejan puntos de vista que la mayoría de los físicos quisieran conservar. Estas son (asumiendo que la mecánica cuántica es válida de manera universal, y en particular se aplica entonces a todo sistema físico) : i) Los estados cuánticos dan una descripción completa de los sistemas físicos que describen, ii) Los estados cuánticos que representan sistemas físicos siempre evolucionan según la ecuación de Schrödinger y iii) los experimentos concretos dan resultados específicos. Para apreciar mejor el significado de estas aseveraciones notamos que opciones se abren al negar individualmente a cada una de ellas. El negar i) nos lleva hacia teorías en que aparte del estado cuántico se requiere de otras variables para describir la condición física de un sistema (lo que se suele llamar *teorías de variables ocultas* entre las cuales está la mecánica bohmiana mencionada en la introducción). El negar ii) nos lleva ya sea a la versión estándar de la cuántica, que como dijimos involucra dos distintas leyes de evolución, o al más refinado enfoque de las teorías con colapso espontáneo de las que hablaremos más abajo, y finalmente el negar iii) nos abre el camino hacia las *teorías de muchos mundos*, o *de muchas mentes* de las que no hablaremos acá (a pesar de que suelen considerarse las alternativas más populares entre los físicos) y nos limitamos a referir al lector interesado a algunas fuentes (Wallace, 2012) y discusiones críticas (Kent, 1990) (estas referencias pretenden ser solo ilustrativas, pues se ha escrito mucho sobre el tema y es difícil encontrar unos pocos trabajos que sean ampliamente representativos).

En este punto vale la pena mencionar que a pesar de que entre la gran mayoría de físicos estos asuntos no suelen considerarse ni importantes ni prioritarios, y de hecho para muchos

de ellos son simplemente irrelevantes o hasta absurdos, contamos con claras declaraciones de algunos físicos prominentes, alertándonos sobre la problemática. Entre éstos el Prof. Steven Weinberg (Nóbel de Física 1979 por sus trabajos sobre la teoría de la física de partículas) en uno de sus últimos escritos (Weinberg, 2017) indica:

"Today there is no interpretation of quantum mechanics that does not have serious flaws, and we ought to take seriously the possibility of finding some more satisfactory other theory, to which quantum mechanics is merely a good approximation"

Concretamente quiero enfocarme aca, en propuestas que han surgido para modificar la teoría cuántica incorporando mecanismos de colapso espontáneo, independientes de observadores o aparatos, que estaría ocurriendo de manera esporádica, pero todo el tiempo. Entre ellas destacan las propuestas de Ghirardi-Rimini-Weber (Ghirardi et al., 1986), CSL (Pearle, 1989), Lajos Diosi (Diósi, 1997) y Roger Penrose (Penrose, 1996) quienes sugieren que la gravedad podría desempeñar un papel central en el colapso o reducción de los estados cuánticos. Estas teorías contemplan una dinámica unificada que se aplica siempre, y que contiene aspectos de las dos distintas leyes de evolución discutidas arriba, de manera que no se requiere identificar las situaciones en que rige una o la otra.

4. El origen cuántico de la estructura cosmológica

El paradigma inflacionario en cosmología sostiene que el Universo temprano fue llevado como resultado de la violenta y acelerada expansión, a un estado de prácticamente total homogeneidad e isotropía en cuanto a sus aspectos gravitacionales representados en la geometría, como en la distribución de materia representado por sus campos de materia. Sin embargo, nuestro Universo real es muy inhomogéneo, y afortunadamente así es: sin inhomogeneidades no habría galaxias, estrellas, planetas ni vida. Las semillas iniciales de esas inhomogeneidades —regiones ligeramente más densas que otras— habrían surgido, según el modelo inflacionario, de fluctuaciones cuánticas del campo inflatón. Para analizarlo, se descompone el campo inflacionario en ondas de diferentes longitudes y direcciones, cada una equivalente cuánticamente a un oscilador armónico. Por lo tanto, cada una de estas ondas (o modos del campo) es descrita según la cuántica, justamente como el ejemplo del oscilador armónico que discutimos más arriba. En el estado inicial, con que se describe el período inflacionario, el campo estaría en el llamado “vacío cuántico”, el estado de menor energía (correspondiente al caso en que todos los osciladores armónicos están en su estado básico), y que es totalmente homogéneo e isotrópico. Las fluctuaciones cuánticas de las amplitudes de estas ondas darían lugar a las inhomogeneidades primordiales. Todo parece funcionar. Pero surge un dilema profundo: tanto el Universo como el estado cuántico del inflatón son homogéneos e isotrópicos. ¿Cómo, entonces, pueden surgir inhomogeneidades reales —no solo potenciales— en ausencia de cualquier observador o aparato capaz de “medir” y seleccionar una configuración concreta? En un laboratorio, un estado simétrico puede dar lugar, tras una medición, a un resultado no simétrico. Pero en el Universo temprano no había observadores, ni aparatos. Y lo más irónico: la aparición de observadores depende precisamente de que previamente surgieran las inhomogeneidades.

Así, que el problema de la medición cuántica se vuelve crítico en la cosmología inflacionaria. Sin un proceso que rompa la simetría del estado cuántico inicial, no es posible explicar cómo

aparecen las estructuras reales del cosmos. Este problema se identificó inicialmente en el trabajo (Perez et al., 2006), donde se propone que el paradigma inflacionario requiere modificaciones que podrían lograrse mediante la incorporación de teorías de colapso espontáneo, como las descritas anteriormente, y desde entonces, en colaboración con varios colegas hemos estado analizando múltiples aspectos, entre los que podemos apuntar a los tratados en León García et al. (2011); Díez-Tejedor and Sudarsky (2012); Landau et al. (2012); Cañate et al. (2013).

5. Conclusiones

En conclusión, vimos que el problema M aparece en el tratamiento de la cosmología de una forma contundente. Sin alguna modificación de la teoría no se puede explicar cómo aparece la estructura cosmológica, y por lo tanto no se puede dar cuenta de la formación de galaxias, estrellas y de las condiciones que dan lugar a la emergencia de la vida y de nosotros mismos. En ese contexto, pensar que de alguna manera nuestras observaciones o mediciones pudieran jugar un papel en el proceso de emergencia de dicha estructura nos llevaría a un circuito causal cerrado (en que una de las consecuencias del proceso es, a su vez, parte de la causa), lo que consideramos claramente inaceptable (si bien hay colegas que discrepan en este punto, como queda ilustrado, por ejemplo, en Wheeler and Feynman (1945); Price (1997)).

Nuestro grupo de investigación ha mostrado que diversas estrategias propuestas dentro del marco de la física estándar no logran resolver esta paradoja. Estamos explorando la posibilidad de incorporar un mecanismo de colapso autoinducido de la función de onda en el contexto inflacionario. Este mecanismo podría justificar conceptualmente las predicciones del modelo y, además, permitir extraer información sobre las propiedades de la dinámica de los colapsos espontáneos a partir de los datos observacionales. Los resultados preliminares son prometedores, aunque la investigación continúa. En esencia, buscamos modificar el paradigma teórico para que las predicciones exitosas de la cosmología inflacionaria estén plenamente fundamentadas, y no solo calculadas mediante procedimientos conceptualmente incompletos. Un aspecto que vale la pena resaltar es que el enfoque que usamos para tratar esta situación no solo ofrece una solución a las dificultades conceptuales antes descritas (Okón and Sudarsky, 2014), sino que además permite solucionar aspectos problemáticos de ciertas predicciones específicas de los tratamientos tradicionales como el problema de las ondas gravitacionales primordiales (León et al., 2017)⁵ o el de la inflación eterna (Lechuga and Sudarsky, 2024). La extensión del enfoque que incorpora la reducción espontánea de los estados cuánticos también parece ofrecer posibles resoluciones de otros problemas en el área general, como es el de la pérdida de información en la evaporación de Hawking de agujeros negros (Okón and Sudarsky, 2018a; Modak et al., 2015; Bedingham et al., 2016), e incluso una posible explicación del origen de la flecha del tiempo en cosmología (Okón and Sudarsky, 2018b).

Para concluir, entonces hago notar que más que considerar estas dificultades como fallas del modelo tradicional, nosotros las tomamos como señales de que estamos ante una pista que podría ayudarnos a profundizar nuestra comprensión de la física y avanzar hacia una teoría que

⁵A las que no hay que confundir con las ondas gravitacionales generadas por colisiones de objetos astrofísicos compactos, y las que, en contraste con estas últimas, no han sido detectadas, a pesar de que según las predicciones de los tratamientos usuales, y para la mayoría de modelos inflacionarios, ya las deberíamos de haber observado.

unifique la gravitación y la mecánica cuántica, una meta que —hasta ahora— ha eludido incluso los esfuerzos más notables de generaciones de físicos teóricos. Un aspecto que vale la pena resaltar es que en nuestros estudios sobre estos temas nos vemos obligados a incorporar, junto con los análisis de tipo físico y matemático, consideraciones de índole filosófica y conceptual que no es tan común encontrar en el tratamiento de este tipo de temas. Esta circunstancia genera un campo muy fértil para la interacción entre la filosofía y la física, que en nuestro grupo estamos tratando de explotar al máximo.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo del Proyecto PAPIIT No IG100124, y una beca sabática de parte de PASPA/DGAPA de la UNAM, así como la hospitalidad del Departament de Física Quàntica i Astrofísica Universitat de Barcelona, Barcelona, España.

Referencias

- Bach, R., Pope, D., Liou, S.-H., and Batelaan, H. (2013). Controlled double-slit electron diffraction. *New Journal of Physics*, 15:033018.
- Bedingham, D., Modak, S., and Sudarsky, D. (2016). Relativistic collapse dynamics and black hole information loss. *Physical Review D*, 94:045009.
- Bohm, D. (1952). A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden variables” I. *Physical Review*, 85:166–179.
- Cañate, P., Pearle, P., and Sudarsky, D. (2013). Continuous spontaneous localization wave function collapse model as a mechanism for the emergence of cosmological asymmetries in inflation. *Physical Review D*, 87:104024.
- Castagnino, M., Fortín, S., Laura, R., and Sudarsky, D. (2017). Interpretations of quantum theory in the light of modern cosmology. *Foundations of Physics*, 47:1387–1422.
- Diez-Tejedor, A. and Sudarsky, D. (2012). Towards a formal description of the collapse approach to the inflationary origin of the seeds of cosmic structure. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 07:045.
- Diósi, L. (1997). A universal master equation for the gravitational violation of quantum mechanics. *Physics Letters A*, 120:377–381.
- Durrer, R. (2020). *The Cosmic Microwave Background*. Cambridge University Press.
- Ghirardi, G., Rimini, A., and Weber, T. (1986). Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Physical Review D*, 34:470–491.
- Guerrero, O., Barrón-Palos, L., and Sudarsky, D. (2024). On the electric dipole moment of the neutron and its quantum uncertainty. *Annals of Physics*, 469:169761.

- Kent, A. (1990). Against many-worlds interpretations. *International Journal of Modern Physics A*, 5:1745–1762.
- Landau, S., Scoccola, C., and Sudarsky, D. (2012). Cosmological constraints on non-standard inflationary quantum collapse models. *Physical Review D*, 85:123001.
- Lechuga, R. L. and Sudarsky, D. (2024). Eternal inflation and collapse theories. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2024(01):038.
- León, G., Majhi, A., Okón, E., and Sudarsky, D. (2017). Reassessing the link between B modes and inflation. *Physical Review D*, 96:101301.
- León García, G., De Unanue, A., and Sudarsky, D. (2011). Multiple quantum collapse of the inflaton field and its implications on the birth of cosmic structure. *Classical and Quantum Gravity*, 28:155010.
- Maudlin, T. (1995). Three measurement problems. *Topoi*, 14:7–15.
- Modak, S. K., Ortíz, L., Peña, I., and Sudarsky, D. (2015). Nonparadoxical loss of information in black hole evaporation in a quantum collapse model. *Physical Review D*, 91:124009.
- Okón, E. and Sudarsky, D. (2014). Benefits of objective collapse models for cosmology and quantum gravity. *Foundations of Physics*, 44:114–143.
- Okón, E. and Sudarsky, D. (2018a). Losing stuff down a black hole. *Foundations of Physics*, 48:411–428.
- Okón, E. and Sudarsky, D. (2018b). A (not so?) novel explanation for the very special initial state of the universe. *Classical and Quantum Gravity*, 33:225015.
- Pearle, P. (1989). Combining stochastic dynamical state-vector reduction with spontaneous localization. *Physical Review*, 39:2277–2289.
- Penrose, R. (1996). On gravity's role in quantum state reduction. *General Relativity and Gravitation*, 28:581–600.
- Perez, A., Sahlmann, H., and Sudarsky, D. (2006). On the quantum origin of the seeds of cosmic structure. *Classical and Quantum Gravity*, 23:2317–2354.
- Price, H. (1997). *Time's Arrow & Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*. Oxford University Press.
- Pusey, M. F., Barrett, J., and Rudolph, T. (2012). On the reality of the quantum state. *Nature Physics*, 8:475–478.
- Wallace, D. (2012). *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation*. Oxford University Press.
- Weinberg, S. (2017). The trouble with quantum mechanics. *The New York Review of Books*.
- Wheeler, J. A. and Feynman, R. P. (1945). Interaction with the absorber as the mechanism of radiation. *Reviews of Modern Physics*, 17:157–181.