

ISSN 2422-8095

# SI MUOVE

NÚMERO 18 - OTOÑO 2020

# EL ORIGEN CUÁNTICO DEL UNIVERSO

**Autor:** Dr. Gabriel R. Bengochea, Investigador del CONICET en el Instituto de Astronomía y Física del Espacio (CONICET-UBA). Presidente del Club de Astronomía Ing. Félix Aguilar ([www.caifa.com.ar](http://www.caifa.com.ar)). [gabriel@iafe.uba.ar](mailto:gabriel@iafe.uba.ar).

“Einstein, deje de decirle a Dios lo que tiene que hacer.”

Niels Bohr

01



*¿Por qué nos resulta interesante tratar de entender el origen del universo? Todo lo que hoy observamos, incluyendo nuestra existencia, surgió de ese suceso. El estudio de la época muy temprana del universo involucra el terreno ideal para estudiar la interfase entre dos de las más exitosas teorías físicas de la actualidad, la Relatividad General y la física Cuántica. Pero además es un área en la que contamos con una gran cantidad de datos observacionales para poner a prueba nuestras ideas teóricas. Dos de los padres de la física Cuántica, Niels Bohr y Werner Heisenberg, compartían algunos pensamientos que podrían describirse así: **la física Cuántica nos dice que hay una línea entre lo observado y el observador, y por lo tanto la ciencia debe limitarse a lo que se observa. Debemos renunciar a una teoría completa, objetiva y realista del mundo.** Este artículo orbitará alrededor de estas ideas, y propone que hoy estamos en posición de intentar desafiarlas, al menos en parte, a través de la cosmología, buscando el origen cuántico del universo.*

## Física Clásica vs física Cuántica

Aquí vamos a referirnos a la física Clásica como aquella descrita por las leyes de Newton (o por las teorías de la Relatividad de Einstein). A estas leyes las usamos para calcular y predecir, por ejemplo, cuáles son los valores de la posición y la velocidad de un objeto a un tiempo dado. Dados los valores a un instante, las leyes de Newton nos

permiten predecir perfectamente cuál será su trayectoria en el espacio. Desde este punto de vista, la física Clásica es objetiva, completa y realista. Brevemente, con *objetiva* queremos decir que no depende de que alguien haga las mediciones (no necesitamos de un observador); es *completa* porque en la teoría está toda la información necesaria para describir las propiedades de los objetos (o sea, todo

elemento de la 'realidad' tiene una contraparte en la teoría); y *realista* porque los elementos de la teoría describen realmente objetos *reales* que tienen propiedades con valores bien definidos. Esos objetos existen en el mundo independientemente de que alguien los observe y, con la teoría, uno puede predecir esos valores.

Por otra parte, en física Cuántica estándar las propiedades físicas como la posición o la velocidad de un objeto en general, *no tienen valores definidos hasta que se lleve a cabo una medición*<sup>1</sup>. Toda la información accesible de un sistema cuántico está contenida en lo que llamamos su *función de onda*. Dicha función no es algo que uno pueda observar, sino que es lo que nos permite poder calcular probabilidades, con una regla para tal fin dada por Max Born en 1926, la cual constituye uno de los postulados de la mecánica cuántica.

¿Probabilidades para qué? Para los posibles valores que podrían obtenerse de magnitudes físicas<sup>2</sup> (como la posición, por ejemplo), si realizáramos una medición con algún dispositivo apropiado para medir la propiedad física que nos interesa conocer (la posición del objeto en nuestro ejemplo). Con esta teoría hemos podido describir de manera extremadamente precisa y exitosa numerosos fenómenos y experimentos: desde los átomos y las partículas elementales, a cómo es que brilla el Sol y las demás estrellas; la energía nuclear, los láseres y toda la electrónica que utilizamos en nuestra vida cotidiana, por citar solo algunos ejemplos. De hecho, nuestra idea es que todo el universo en su esencia es cuántico y entonces nuestras teorías macroscópicas cotidianas serían solo muy buenas aproximaciones clásicas de algo más profundo y fundamental. Pero, ¿cómo es que los objetos macroscópicos de nuestra vida cotidiana, estando compuestos de átomos, no parecen estar descritos por la física que tan exitosamente describe los átomos?

En 1927 Werner Heisenberg propuso lo que se conoce como *Principio de incertidumbre*<sup>3</sup>. Este principio nos dice

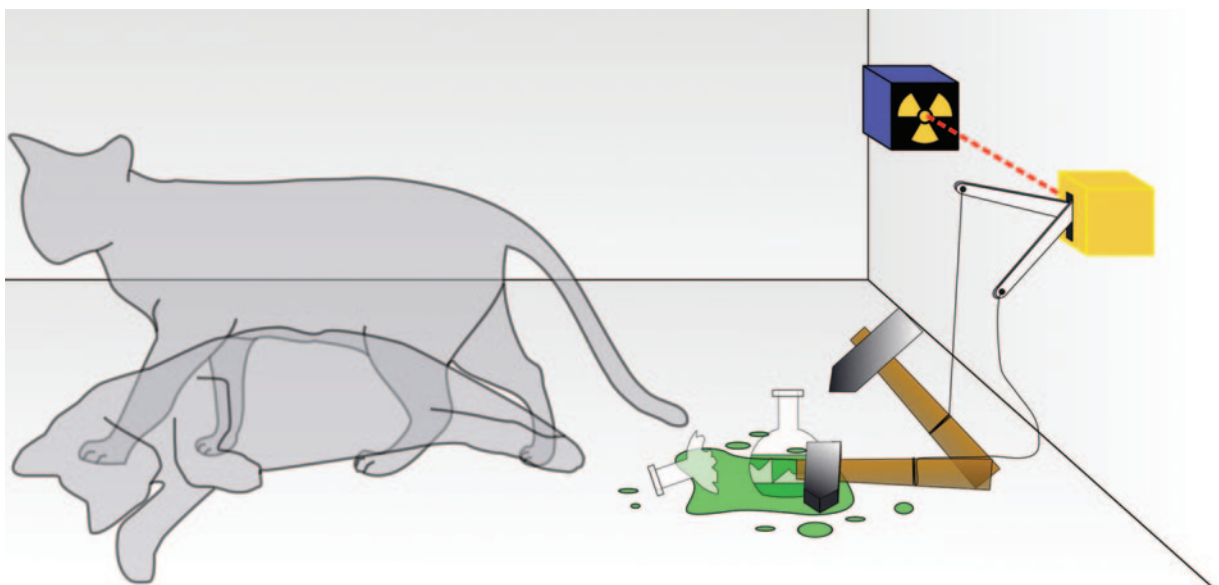
que cuanto mejor determinado esté el valor de cierta magnitud física en cierto estado cuántico (la posición, por ejemplo), menos determinado estará el valor de otra magnitud conjugada (su momento, o la velocidad). Recordemos que, según la física Clásica de Newton, los objetos tienen, en cualquier instante, todos los valores de todas las propiedades perfectamente definidos. En cambio, las incertidumbres cuánticas, junto con la regla de probabilidades de Born, nos dan el rango en el que más probablemente estarán los valores de las propiedades si hiciéramos mediciones. Hasta que no hagamos mediciones con aparatos diseñados para conocer los valores de las magnitudes físicas observables, estos (e inclusive las propiedades mismas) no están determinados, y además no son independientes. De esta manera, aunque midamos algunas propiedades, otras

**01** *Representación de la evolución del universo según el modelo del Big Bang. El origen de las estructuras que hoy vemos en el cielo habría tenido lugar en épocas muy tempranas del universo, que podemos describirlas combinando la teoría de gravedad de Einstein y la física Cuántica.*

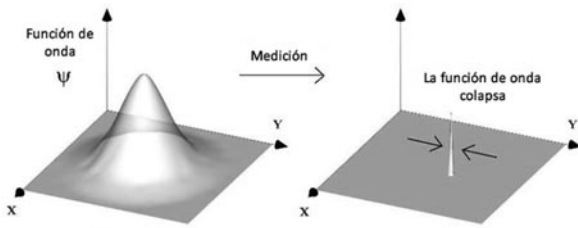
**02** *Esquema del experimento pensado que plantea la Paradoja del gato de Schrödinger y el problema de la medición en la física Cuántica. Hasta que no realizamos una medición, todo el conjunto se encuentra en una superposición de todos los valores posibles. Pero en nuestra vida cotidiana no observamos gatos en estados de superposición.*

**03** *Colapso de la función de onda. En la interpretación estándar de la física Cuántica, hasta que no se lleva a cabo una medición la función de onda de un sistema es una superposición de todos los estados y valores posibles consistentes con el principio de incertidumbre de Heisenberg. Cuando se realiza una medición con algún aparato, la función de onda colapsa haciéndose muy angosta y como resultado de ello se obtienen valores bien definidos.*

02



03



permanecerán indefinidas o serán alteradas. Entonces, el estado cuántico más general será un estado de superposición. Por superposición queremos decir que, como los valores de algunas propiedades no están determinados, el estado cuántico es una “combinación” de los posibles estados y la regla de Born nos permite calcular, a partir de la superposición, las probabilidades de los posibles valores. Es aquí donde entra en juego la mascota más conocida en la física: el gato de Schrödinger. Erwin Schrödinger fue quien logró formular en 1925, siguiendo las ideas de Luis de Broglie, una ecuación (hoy conocida como la *ecuación de Schrödinger*), que determina cómo evoluciona en el tiempo la función de onda de un sistema cuántico y sus probabilidades. Es la ecuación pilar de la física Cuántica. Y con ella vamos a plantear lo que se conoce como *la paradoja del gato de Schrödinger*.

**El problema de la medición en la física Cuántica**

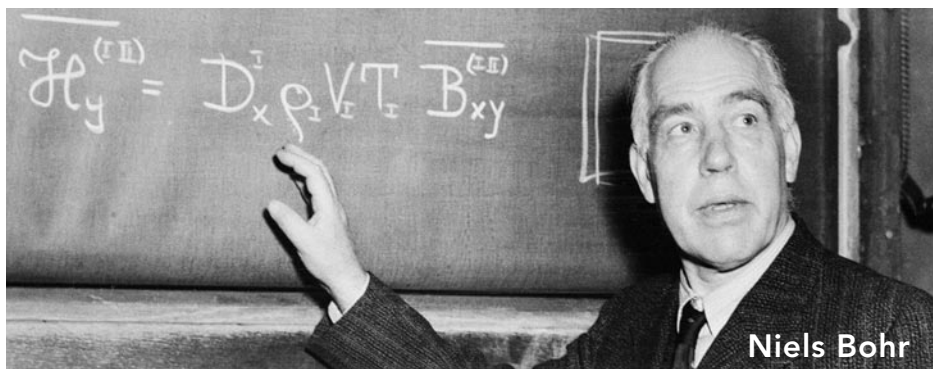
El experimento teórico que Schrödinger pensó en 1935 consiste en lo siguiente: dentro de una caja bien cerrada y sin ventanas hay un gato. En la caja junto a él hay una botella que contiene un veneno mortal y también hay un dispositivo atómico *aleatorio* con dos estados posibles, con un 50% de probabilidad cada uno de ellos. Uno de los estados del dispositivo tiene un 50% de probabilidad de actuar sobre un martillo rompiendo la botella, liberando el veneno y así matando al gato, en algún momento que no podemos precisar con exactitud. El otro estado tiene un 50% de probabilidad de no actuar, y por lo tanto el gato seguirá vivo. Pero, y aquí viene el punto importante, la física Cuántica nos dice que el estado más general del dispositivo atómico es una combinación de los dos estados posibles. Pero tanto el dispositivo, como la botella con el veneno, el martillo, el gato y la caja están hechos de átomos. Por lo tanto, todo debería ser descripto por la física Cuántica, si esta, como se supone, es aplicable a todo lo que hay en el universo. Si el dispositivo atómico inicialmente está en un estado cuántico de superposición, al considerar tanto el aparato como el gato como sistemas cuánticos que interactúan entre ellos, el estado del gato se “*entrelazará*” con el del dispositi-

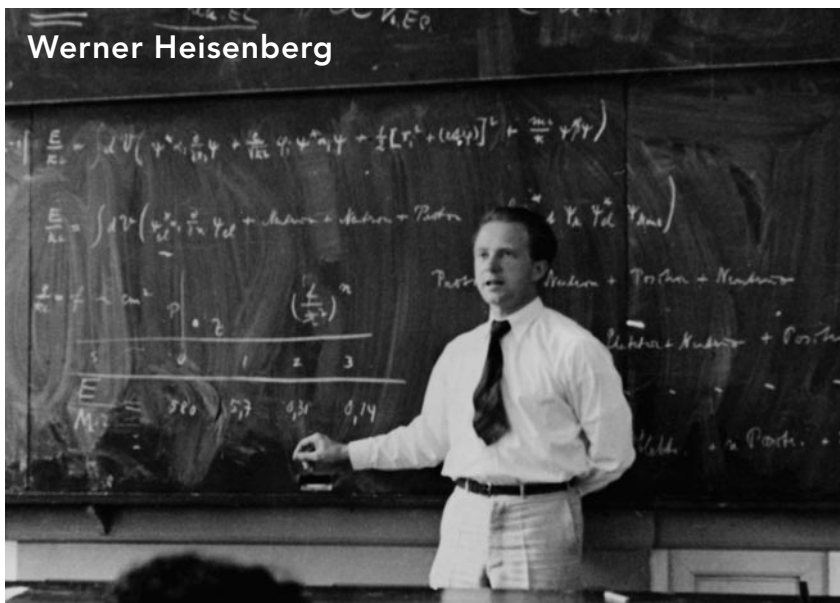
tivo, y entonces, también estará en un estado de superposición hasta que se realice alguna medición. Si quisiésemos saber algo, por ejemplo sobre la propiedad “*vida del gato*”, según la física Cuántica (en su interpretación estándar), hasta que no hagamos una medición de dicha propiedad el estado cuántico más general es una superposición de los dos estados posibles: ‘*gato vivo*’ y ‘*gato muerto*’, con 50% de probabilidad para cada posibilidad. Esto es, el gato no está vivo ni muerto. No hay valor definido de la propiedad “*vida del gato*”<sup>4</sup>. Y es un estado perfectamente válido y posible para la física Cuántica.

La ecuación de Schrödinger, que nos permite saber la evolución en el tiempo del estado de cualquier sistema cuántico, determina que el gato seguirá en el estado de superposición “*vivo-muerto*” hasta que alguien o algún aparato para tal fin haga una medición (abrir la caja, por ejemplo). La ecuación de Schrödinger no destruye superposiciones, probabilidades, no rompe simetrías presentes; es determinista y reversible. Con determinista queremos decir que se puede conocer perfectamente a cada instante cuál es la función de onda del sistema. Y reversible, porque en todo momento podemos calcular hacia atrás o adelante en el tiempo, cuál es y cuánto vale la función de onda. A esto lo llamaremos “*Proceso 1*”.

Pero luego de una medición, algo pasa. La función de onda “*colapsa*” y se obtiene un valor bien determinado (por ejemplo, la vida del gato resulta en “*gato vivo*”). Este otro proceso es aleatorio (podría haber resultado “*gato muerto*”), es irreversible (una vez que medimos, no podemos saber si antes de eso el gato estaba vivo, muerto, o vivo-muerto) y, por lo tanto, se pierde información. A este segundo proceso lo llamaremos “*Proceso 2*”.

De manera análoga, cuando un científico prepara un sistema en un laboratorio (partículas en un acelerador, por ejemplo) en un estado de superposición (por ejemplo, para la posición) y luego dicho sistema interactúa con algún aparato de medición destinado a medir la posición, los estados de los indicadores y las agujas del aparato se entrelazarán con las del sistema y, entonces, todo el conjunto (sistema+aparato) termina en un estado de superposición cuántico. Mientras nada ni nadie haga una medición, las agujas del aparato continuarán en un estado de superposición. ¡Lo que definitivamente no es observado en el laboratorio!





Werner Heisenberg

Entonces, si la teoría Cuántica es aplicable a todo, ¿por qué objetos pequeños como átomos pueden permanecer en estados de superposición, pero objetos cotidianos, como mi silla o las agujas de un aparato, no están en una superposición de dos lugares al mismo tiempo?

La situación general es, entonces, que hasta que no hacemos una medición, el estado más general de un sistema físico es estar en una superposición de estados, y las incertidumbres cuánticas, junto con la regla de Born, nos dicen los rangos de valores posibles y más probables para las propiedades. Y luego, cuando llevamos a cabo una medición para conocer alguna magnitud física, la posición  $X$  digamos, la función de onda colapsa y se obtiene para  $X$  un valor bien definido, compatible con el Principio de incertidumbre.

Pero, ¿cómo pasamos de una superposición de estados para  $X$  a otro estado sin superposiciones, y con un valor bien definido de  $X$  si la ecuación de Schrödinger no destruye superposiciones? Si alguien (o algo, para tal fin) realizara una medición, nos revelaría en qué estado está el sistema. Pero algo 'externo' debe hacer colapsar la función de onda a otro estado bien definido. Por otra parte, es importante decir aquí que, además, el concepto "medición" no está satisfactoriamente definido dentro de la física Cuántica. ¿Qué tan grande debe ser un objeto para que su estado colapse y no se encuentre en una superposición? ¿Del tamaño de un gato? ¿Cuándo sucede una medición? La Cuántica no nos lo dice. No hay un criterio claro de cuándo debemos usar la evolución dada por el *Proceso 1* y cuándo emplear el *Proceso 2* que determina el colapso de la función de onda cuántica. Esto se conoce como "el problema de la medición" en la física Cuántica<sup>5</sup>.

En la física Clásica las cosas suceden siguiendo determinadas leyes sin importar que existan observadores que decidan cuándo y cómo hacer mediciones para que se aplique una u otra ley de evolución. ¿Por qué la Cuántica parece ser tan diferente?

Hemos dicho que la evolución cuántica, dictada por la ecuación de Schrödinger, no puede producir el colapso de la función de onda. Entonces, ¿qué lo produce? Algunos, como Bohr, sostenían que la física debe encargarse solo de lo que se observa. Esto es, renunciar a una teoría objetiva, libre de una descripción del mundo por quién decide observar. Otros dicen que es culpa del aparato de medición. El aparato interactúa con el objeto, le modifica el estado y sucede el colapso. Pero, ¿cuán grande debe ser un aparato para ser y actuar como aparato? ¿Un electrón orbitando un núcleo atómico está midiendo los protones del núcleo? ¿Será quizás el observador el que

hace que la función de onda colapse? ¿Y qué representa un observador? ¿Un humano? ¿Un chimpancé? ¿Un gato?

Otra versión dice que, puesto que un objeto completamente aislado del resto del mundo no existe, el *medio ambiente* es el que interactúa con el objeto, altera su estado y produce que la superposición macroscópica de todos los estados posibles desaparezca y resuelva todo el asunto<sup>6</sup>.

Pero, ¿cuál es la regla a aplicar para decidir en cada caso dónde termina el objeto y dónde comienza y termina el medio ambiente? ¿Qué cosa o quién es el que decide qué es y qué no es medio ambiente? ¿Somos nosotros? ¿Entonces la naturaleza cuántica del mundo depende de que nosotros existamos? La realidad es que nada de esto está bien definido en la teoría Cuántica y nada de esto ha podido resolver el problema de la medición. Entonces, la pregunta *¿cómo pasamos de un estado de superposiciones cuánticas a otro estado sin superposiciones?* al día de hoy no tiene una respuesta completa y satisfactoria.

¿Por qué entonces es tan exitosa la física Cuántica si tiene este problema de la medición? La respuesta está en que la Cuántica trata acerca de hacer mediciones, y cuando queremos emplear la teoría, en la práctica, dividir el mundo entre lo observado y el observador resulta fácil en un laboratorio a pesar de que la teoría no nos proporcione una regla clara al respecto. En general está muy definida la separación entre cuál es el objeto de estudio y qué constituye el aparato. A lo sumo, bastará con incorporar más componentes al sistema cuántico objeto hasta que las predicciones ya no se alteren más, y así los resultados serán concordantes con lo observado. Por otra parte, siempre resulta sencilla la mencionada separación en las situaciones de laboratorio, porque la escala de los sistemas cuánticos de estudio (átomos, por ejemplo) está muy alejada de la escala humana, de la escala de los aparatos y también de la resolución y precisión de nuestros aparatos.

Pero esto no puede ser del todo satisfactorio. Y aquí es donde nos movemos al terreno del universo a gran es-

cala. El problema de la medición cuántica empeora terriblemente en el caso cosmológico<sup>7</sup>. Veamos por qué.

### El caso cosmológico

El modelo del Big Bang, con el que buscamos describir cómo fueron el origen del universo y su evolución temporal hasta llegar a nuestros días, involucra fundamentalmente los dos pilares de la física moderna: la gravitación (la teoría de la Relatividad General de Einstein) y la física Cuántica. Más precisamente, cuando queremos entender cómo fueron los primeros instantes del universo y cómo surgieron las primeras “semillas” (las *inhomogeneidades* primordiales<sup>8</sup>) de la estructura cósmica, que luego terminaron en, digamos, galaxias, la física Cuántica toma un rol extremadamente protagonista en esta descripción. Estos primeros instantes del universo están descritos por un modelo que llamamos *inflación cósmica*.

Fundamentalmente con el trabajo de Alan Guth en 1981 [5], y por trabajos de Andrei Linde, Paul Steinhardt, Andreas Albrecht, Viacheslav Mukhanov, Alexei Starobinsky y Stephen Hawking entre otros [6-12], surgió la propuesta de que si al comienzo de su historia ( $\sim 10^{-35}$  segundos) el universo hubiera atravesado por una brevísima fase inflacionaria de expansión acelerada conducida por un exótico campo llamado *inflatón*<sup>9</sup>, algunos problemas para entonces ya conocidos del modelo estándar del Big Bang podían ser resueltos, y todos ellos con un mismo mecanismo.

No entraremos en detalle aquí sobre cuáles eran esos problemas, ya que no es el objetivo de este artículo. Lo que nos interesa decir es que a partir de un encuentro científico llevado a cabo en Cambridge (Reino Unido) en 1982, organizado por Gibbons y Hawking, y con las ideas de un trabajo de Andrei Sakharov de 1965 en mente [13], dichos autores empezaron a mostrar que el surgimiento de las semillas de las estructuras en el universo podría haber ocurrido debido a “*fluctuaciones cuánticas*”<sup>10</sup> de ese campo inflatón durante ese mismo proceso inflacionario. La evolución gravitacional de esas semillas generadas en inflación, con el paso del tiempo, habrían terminado en todo lo que observamos hoy en el cielo; y esa evolución, además, parece estar muy bien reproducida con simulaciones numéricas que se llevan a cabo con grandes arreglos de computadoras.

Una de las líneas observacionales que más desarrollo ha tenido y que más cantidad de datos ha logrado en las últimas décadas, es la que trata con el análisis de lo que se



conoce como el *fondo cósmico de microondas*. Este fondo cósmico es radiación electromagnética que nos llega con un espectro prácticamente idéntico desde todas las direcciones del cielo (hoy con mayor intensidad en el rango de las microondas), y caracterizado con una temperatura media de tan solo unos 2,7K. La existencia de esta radiación fue predicha hacia fines de los años '40 por George Gamow, pero fue descubierta recién en 1965 por Arno Penzias y Robert Wilson. Pensamos que proviene de la época en la cual se generaron los primeros átomos neutros en el universo, unos 380 mil años después del Big Bang. El análisis estadístico de las pequeñas diferencias en la temperatura de esta radiación que se observan en las diferentes direcciones del cielo constituye lo que se llama el estudio de las *anisotropías* del fondo cósmico de microondas. Estas pequeñísimas diferencias de temperatura son de una parte en cien mil. Teóricamente, como empezaron a mostrar los autores que mencionamos más arriba, esperamos que estas diminutas diferencias de temperatura estén presentes en el cielo, puesto que serían el resultado de la evolución de las semillas (*perturbaciones primordiales*) generadas al comienzo del universo, y cuyo origen se lo atribuimos al mecanismo de inflación. El hecho sorprendente es que las anisotropías observadas en el cielo son exactamente como las que predice el modelo inflacionario, y sin este modelo hoy resultaría bastante difícil poder explicar el origen de lo que observamos<sup>11</sup>.

Entonces, hasta aquí tenemos esta situación: observamos grandes estructuras (galaxias y cúmulos de galaxias) y también pequeñas anisotropías en la temperatura del fondo cósmico de microondas. Suponemos que su origen se remonta al comienzo del universo, donde debieron existir las semillas cósmicas originales. Hacemos nuestras cuentas y todo encaja perfectamente entre teoría y observación. Pero, ¿de dónde salieron esas semillas iniciales? ¿Cómo se generaron durante la inflación cósmica?

Es aquí donde vuelve a aparecer nuestra protagonista principal del artículo: la física Cuántica.

¿Cómo aplicamos la ecuación de Schrödinger de la física Cuántica al caso del inflatón al comienzo del universo? ¿Cuál pensamos que fue el estado cuántico inicial de las perturbaciones primordiales con el que hacemos nuestros cálculos para hacer predicciones teóricas?

Al momento en que comienza a ocurrir la fase inflacionaria tenemos, por un lado, el espacio-tiempo (cuya evolución es descrita por las ecuaciones de Einstein de la Relatividad General) y, por otro lado, el campo inflatón que produce la expansión acelerada y cuyas inhomogeneidades queremos saber cómo surgieron cuánticamente<sup>12</sup>. Luego, las ecuaciones de Einstein nos dictan cómo reacciona y es afectado el espacio-tiempo (su curvatura) ante la presencia de las inhomogeneidades del campo inflatón. Suponemos que inicialmente el espacio-tiempo fue el más simétrico y sencillo de todos. Era perfectamente isótropo (no había dirección privilegiada) y homogéneo (todos los puntos del espacio eran idénticos). Suponemos, además, que las inhomogeneidades del inflatón se encontraban al comienzo de inflación en un estado de vacío cuántico perfectamente isótropo y homogéneo. O sea, un estado con energía definida y que poseía también las mismas simetrías que el espacio-tiempo inicial<sup>13</sup>. Podríamos partir de una situación inicial diferente, un poco más compleja, sin algunas simetrías, o que ya de antemano contenga las semillas cósmicas de las futuras galaxias. Pero entonces nos encontraríamos con la tarea extra de elaborar otra teoría para explicar por qué el universo nació con una situación más compleja y no la más sencilla. Al igual que con cualquier sistema cuántico, podemos ahora calcular los valores esperados y las incertidumbres cuánticas de las perturbaciones en el estado cuántico de vacío. Y de la misma manera que cuando dijimos que en un experimento de laboratorio hasta que no ocurra una medición para la posición de una partícula en general esta no está definida, que se encuentra en un estado de superposición y que además la incertidumbre cuántica nos dice en qué rango de valores posibles más probables podremos encontrarla cuando midamos, lo mismo debe aplicar ahora a nuestro caso del universo cuántico. En el caso del laboratorio, cuando medimos algo la función de onda colapsa y de esa manera nuestros aparatos nos dan valores definidos.

Entonces es cuando surge la pregunta central de este artículo: ¿cómo pasamos cuánticamente de un estado de vacío, con superposiciones, perfectamente isótropo y homogéneo (sin semillas cósmicas), a otro estado que no es

más isótropo y homogéneo, con las semillas de estructuras? Hemos dicho que el estado cuántico de un sistema contiene toda la información de dicho sistema y que la evolución de cualquier estado cuántico es dictada por la ecuación de Schrödinger, la que no rompe ninguna simetría ni destruye superposiciones cuánticas. Hasta que no se rompan las simetrías y cambie el estado cuántico el espacio seguirá siendo isótropo y homogéneo, la curvatura del espacio será igual en cada punto y, por lo tanto, no habrá ninguna posibilidad de que aparezca en algún lugar una galaxia o cualquier otra cosa en el futuro.

¿Quién o qué cosa realizó una medición produciendo el colapso, la pérdida de las simetrías iniciales y el surgimiento de las semillas de estructura al comienzo del universo, otorgando valores bien definidos para las perturbaciones del inflatón y del espacio-tiempo? ¿Fue algún aparato? ¿Algún observador? ¿El medio ambiente? Por supuesto, queremos pensar que nada de esto existía al comienzo del universo.

Típicamente, la versión más ortodoxa de este análisis recurre al Principio de incertidumbre para decir que las “*fluctuaciones cuánticas del vacío*”<sup>14</sup> iniciales son el mecanismo de generación de las semillas de las estructuras. Desde este enfoque, las fluctuaciones cuánticas tienen existencia real en el universo. O sea, los campos cuánticos adquieren en cada instante valores reales, aleatorios pero bien definidos, y hacen que la curvatura del espacio se modifique (y oscile como un resorte, por ejemplo), de la misma manera que en la teoría de Newton la posición de una pelota de tenis va tomando valores definidos siguiendo una trayectoria en el espacio. Esto contradice lo que entendemos de la física Cuántica y no es lo que tenemos en mente cuando un experimentador hace su trabajo en un laboratorio terrestre. Las fluctuaciones cuánticas no son otra cosa que las incertidumbres cuánticas<sup>15</sup>. Y una incertidumbre cuántica distinta de cero para las perturbaciones en el estado de vacío lo único que nos brinda, junto con la regla de Born, es el rango de sus valores más probables, pero que *no hay valores definidos* para las perturbaciones hasta

“Con esta teoría hemos podido describir de manera extremadamente precisa y exitosa numerosos fenómenos y experimentos: desde los átomos y las partículas elementales, a cómo es que brilla el Sol y las demás estrellas; la energía nuclear, los láseres y toda la electrónica que utilizamos en nuestra vida cotidiana, por citar solo algunos ejemplos.”

que se lleve a cabo una medición. Al igual que en un laboratorio, debemos hablar siempre de posibles resultados de mediciones para que las predicciones de la física Cuántica tengan algún sentido. Por lo tanto, bajo este enfoque del análisis, todos los puntos del espacio deben seguir siendo equivalentes, el espacio permanece isótropo y homogéneo, y no hay semillas de estructura de ningún tipo. Las fluctuaciones cuánticas del vacío no pueden ser las semillas para formar estructuras. El estado de vacío tiene fluctuaciones (las incertidumbres cuánticas) pero no tiene inhomogeneidades [15].

El enfoque estándar, entonces, no puede justificar cómo se encienden las perturbaciones iniciales en el universo temprano. Se requiere algún proceso que actúe “*como una medición*”, tal como sucede en el laboratorio, y que produzca algo como un colapso de la función de onda. Ese nuevo estado deberá contener las perturbaciones o semillas de las estructuras.

### **Nuestro enfoque al problema y otros temas relacionados**

El enfoque que junto a otros colegas adoptamos, como guía para nuestros trabajos de investigación, tiene como eje central el hecho de que pensamos que para dar respuesta al problema de la medición en la física Cuántica, y en particular para el caso del origen cuántico de las semillas primordiales de las estructuras, debemos explorar teorías cuánticas no-estándares. Teorías en donde el colapso de la función de onda sea auto-inducido por algún mecanismo novedoso.

Desde mediados de los '70 y más intensamente en los '80 y '90, autores como Pearle, Ghirardi, Rimini, Weber, Penrose, Diosi y otros [16-20], comenzaron a buscar y desarrollar modificaciones a la ecuación de Schrödinger para alterar la evolución del estado cuántico y que se produjera el colapso de la función de onda, sin observadores externos ni aparatos presentes que tengan que hacer mediciones; y de esa manera, resolver el problema de la medición en la física Cuántica. Y que con esa misma teoría se puedan explicar tanto los fenómenos microscópicos excelentemente descritos por la teoría Cuántica estándar, así como también los fenómenos macroscópicos que no presentan superposiciones (en estas teorías, el gato de Schrödinger está vivo o ya está muerto antes de que abramos la caja). Es decir, buscaron lograr una teoría que con la misma ecuación puedan describirse estados de superposición de electrones, por ejemplo, y también que dé cuenta de por qué los gatos y los objetos cotidianos no lo están.

La modificación a la ecuación de Schrödinger debe ser tal que evite las superposiciones cuánticas para objetos macroscópicos y los localice en el espacio de la manera en la que vemos que sucede cotidianamente. Para ello, debe incorporar algún “*mecanismo de amplificación*” que discrimine objetos pequeños de grandes y que la dinámica misma provoque los colapsos y conduzca cualquier estado cuántico inicial a otro, de manera estocástica (para explicar la aleato-

riedad observada en los resultados de mediciones en laboratorio) y reproduciendo las exitosas predicciones de las reglas de probabilidades cuánticas propuestas por Max Born. Guiados fundamentalmente por las ideas de Diosi y Penrose, en el año 2006 Daniel Sudarsky y colaboradores propusieron aplicar las ideas de modificar la teoría Cuántica al caso cosmológico [21]. Es decir, incorporar en las ecuaciones de Einstein para la dinámica del universo los efectos de los colapsos auto-inducidos de teorías cuánticas modificadas.

De esta manera, durante el período de inflación cósmica se habrían producido colapsos espontáneos en los estados de vacío cuánticos iniciales, semejantes a una medición, de tal forma que el resultado final es un nuevo estado con simetrías diferentes a las iniciales, sin superposiciones cuánticas, encendiendo las perturbaciones y dándoles valores definidos no nulos, alterando la curvatura del espacio-tiempo y creando de esta manera las semillas de estructura en el universo. Sin observadores ni aparatos de medición.

Con estas modificaciones pueden realizarse predicciones teóricas, las que luego permiten poner a prueba estas teorías y así poder decir algo sobre su viabilidad para explicar las precisas observaciones existentes, por ejemplo, del fondo cósmico de microondas. Algunas predicciones han resultado ser muy interesantes puesto que han podido explicar ciertas cotas observacionales de una manera más natural y clara que en el caso estándar (por ejemplo, [22-27]).

Estas ideas siguen evolucionando. Más recientemente, se ha mostrado que este enfoque permitiría abordar de manera diferente otros interrogantes de origen gravitacional que están abiertos desde hace muchos años. Tales son los casos de la paradoja de la información en los agujeros negros y el origen de la energía oscura [28-29]. La propuesta de algunos autores acerca de que podrían existir otros universos además del nuestro, está atada, en parte, a la ocurrencia de la fase inflacionaria al comienzo del universo y a los problemas teóricos que se mencionaron anteriormente. Por lo tanto, este enfoque también podría convertir en un mito la posibilidad de que exista el llamado “*multiverso*” [30-31]. Aún las teorías cuánticas modificadas no están en sus versiones finales, enfrentan sus propios interrogantes y son un desafiante trabajo en progreso.

### **Epílogo: el secreto cuántico**

El Big Bang, nuestro modelo para el universo, combina fundamentalmente dos de las más exitosas teorías desarrolladas en el siglo XX: la Relatividad General y la física Cuántica. El modelo describe y explica de manera exitosa numerosas observaciones cosmológicas. Aun así, sabemos que no puede ser la versión final de la historia. Al día de hoy aún no tenemos una teoría cuántica de la gravedad completamente satisfactoria que logre unificar ambas teorías. Por lo que no conocemos, entre otras cosas, el origen y la naturaleza del espacio-tiempo, ni el origen de los campos cuánticos como el caso del inflatón.

Existen propuestas para lograr una física Cuántica que de alguna manera resulte, en algún sentido, realista y objetiva, que desafían las ideas originales de científicos reconocidos



como Bohr. Y con estas propuestas no solamente podría resolverse el problema de la medición en la física Cuántica, sino que también podría explicarse de una manera más completa y clara el origen cuántico de las estructuras en el universo temprano.

¿Podrá un mismo mecanismo resolver el problema de la medición de la Cuántica y al mismo tiempo los problemas gravitacionales que aún no tienen solución satisfactoria? Este mecanismo, quizás, también podría servir de guía en la búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad. ■

#### Notas

1 Por física Cuántica “estándar” nos referimos a la llamada *interpretación de Copenhague*, que es la adoptada por la amplia mayoría de los autores en los libros de texto. Sin embargo, las diversas interpretaciones de la física Cuántica estudiadas en la actualidad afrontan los problemas mencionados en el presente artículo. Ver por ejemplo [1].

2 Usamos aquí los términos “*magnitudes físicas*” y “*propiedades físicas*” de los objetos como sinónimos.

3 También llamado más apropiadamente *Principio de indeterminación*. Pero vamos a usar aquí el término incertidumbre por ser el más difundido en la literatura.

4 Pero cuidado: no es que ya podría tener un valor pero no lo sabemos por ignorancia. No tiene ningún valor definido aún, hasta que se realice una medición. Y cuando midamos, aún hay muchas otras propiedades que no pueden tener sus valores definidos simultáneamente.

5 Para más detalles, ver por ejemplo la referencia [2]. Hay quienes optan por negar la existencia de este problema, afirmando que la Cuántica solo trata de cálculos para predecir probabilidades, y que cuando hacemos mediciones en el laboratorio, todo encaja perfectamente. Pero veremos en “*el caso cosmológico*” que esta postura no puede sostenerse.

6 Si bien este enfoque (conocido como *de coherencia cuántica*) en algunos casos logra resolver parcialmente el problema, no termina de ser una solución satisfactoria y, además, suele requerir de un observador externo que subjetivamente decida cuestiones o lleve a cabo mediciones. Un análisis detallado de estos y otros problemas de este enfoque que aquí no mencionamos puede verse en [3].

7 Una de las primeras referencias en donde se nota esto es en la *Introducción* de uno de los trabajos de J. Bell [4].

8 Para ser correctos, en español a algo que no es homogéneo le llamamos *heterogéneo*. Por otra parte, técnicamente, a estas semillas de estructura o “*inhomogeneidades*” las llamamos *perturbaciones*. Por lo tanto, usaré los términos inhomogeneidades o perturbaciones indistintamente.

9 En la naturaleza, muchos fenómenos físicos son descritos a través de campos. Tales como el campo eléctrico, el campo magnético, el campo gravitatorio, etc. El Inflatón habría sido un exótico campo escalar, cuya energía potencial habría sido dominante solo al comienzo del universo, expandiéndolo aceleradamente.

10 Más abajo quedará claro a qué nos referimos con este concepto.

11 Algunos autores reconocidos como P. Steinhardt y R. Penrose han estado destacando que la inflación tiene algunos serios problemas, y es justo mencionar que existen algunas variantes y alternativas al paradigma inflacionario, incluyendo modelos de universos cíclicos. Pero a la fecha no han podido lograr ser suficientemente competitivos.

12 Si bien la versión más estándar procede *cuantizando* tanto el espacio-tiempo como el campo inflatón, aquí adoptaremos el enfoque de que el espacio-tiempo (por lo menos desde inflación) es siempre clásico y que la *cuantización* se realiza solo al campo inflatón. Esto no modifica en nada el eje central del artículo, los problemas que se abordan y las conclusiones.

13 Un estado de vacío es aquel que, por lo menos para algún instante de tiempo, tiene una energía bien definida (y en gene-

ral es mínima). Si bien en este punto hay un problema técnico que no abordaremos aquí, que tiene que ver con que no hay una manera única de elegir un estado de vacío cuántico en un universo que se expande, el consenso es que el estado de vacío inicial de las perturbaciones cosmológicas fue el que se conoce como *vacío de Bunch-Davies*, y es perfectamente isótropo y homogéneo.

14 Nótese que lo correcto sería hablar de las *fluctuaciones cuánticas del inflatón* en el estado de vacío. De hecho esta ligereza en el discurso muchas veces es acompañada con frases como “*las fluctuaciones cuánticas de la energía del vacío*”, la cual es totalmente errónea, puesto que la incertidumbre cuántica de la energía en el estado de vacío es exactamente cero. El argumento de las fluctuaciones cuánticas del vacío también resultó ser inadecuado como mecanismo de resolución del problema de la constante cosmológica [14].

15 La palabra “*fluctuaciones*” en física suele usarse (y confundirse) en varios contextos diferentes. Puede significar las variaciones o el rango de valores para alguna característica dentro de un conjunto; o también puede referirse a variaciones en distintas regiones de algo extendido y homogéneo, como las olas en el mar; o como en este artículo, puede referirse también a la indeterminación cuántica.

#### Referencias

- [1] M. Castagnino et al., *Found. Phys.* **47** (2017) 11, 1387.
- [2] E. Okon, *Rev. Mex. Fis. E* **60** (2014), 130.
- [3] E. Okon and D. Sudarsky, *Found. Phys.* **46** (2016) 7, 852.
- [4] J. S. Bell “*Quantum Mechanics for cosmologists*”, *Quantum Gravity 2*, eds. C. Isham, R. Penrose and D. Sciama (Oxford, 1981), 611.
- [5] A. H. Guth, *Phys. Rev. D* **23** (1981), 347.
- [6] A. D. Linde, *Physics Letters* **108** (1982), 389.
- [7] A. Albrecht and P. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* **48** (1982), 1220.
- [8] V. F. Mukhanov and G. V. Chibisov, *JETP Lett.* **33** (1981), 532.
- [9] A. A. Starobinski, *JETP Lett.* **30** (1979), 682.
- [10] J. M. Bardeen, P. Steinhardt and M. S. Turner, *Phys. Rev. D* **28** (1983), 679.
- [11] R. H. Brandenberger, *Nuc. Phys. B* **245** (1984), 328.
- [12] S. W. Hawking, *Physics Letters* **115** (1982), 295.
- [13] A. D. Sakharov, *J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.)* **49** (1965), 345.
- [14] G. R. Bengochea et al, *Eur. Phys. J. C* **80** (2020), 18.
- [15] D. Sudarsky, *Int. J. Mod. Phys. D* **20** (2011), 509.
- [16] P. Pearle, *Phys. Rev. D* **13** (1976), 857.
- [17] P. Pearle, *Phys. Rev. A* **39** (1989), 2277
- [18] G. C. Ghirardi, A. Rimini and T. Weber, *Phys. Rev. D* **34** (1986), 470.
- [19] R. Penrose, *Gen. Rel. Grav.* **28** (1996), 581.
- [20] L. Diosi, *Phys. Lett. A* **120** (1987), 377.
- [21] A. Perez, H. Sahlmann, y D. Sudarsky, *Class. Quant. Grav.* **23** (2006), 2317.
- [22] P. Cañate, P. Pearle and D. Sudarsky, *Phys. Rev. D* **87** (2013), 104024.
- [23] G. R. Bengochea, P. Cañate and D. Sudarsky, *Phys. Lett. B* **743** (2015), 484.
- [24] G. León and G. R. Bengochea, *Eur. Phys. J. C* **76** (2016), 29.
- [25] S. J. Landau, C. G. Scoccola and D. Sudarsky, *Phys. Rev. D* **85** (2012), 123001.
- [26] M. P. Piccirilli et al., *Int. J. Mod. Phys. D* **28**(2019), 1950041.
- [27] G. León et al., *Phys. Rev. D* **98** (2018), 023512.
- [28] S. K. Modak et al., *Phys. Rev. D* **91** (2015), 124009.
- [29] T. Josset, A. Pérez and D. Sudarsky, *Phys. Rev. Lett.* **118** (2017), 021102.
- [30] G. León, *Eur. Phys. J. C* **77** (2017), 705.
- [31] G. R. Bengochea, *Si Muove* **14** (2017), 15.

**El autor.** Gabriel R. Bengochea es Licenciado y Doctor en Ciencias Físicas de la Universidad de Buenos Aires. Realizó estudios postdoctorales en el Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, CONICET-UBA) y actualmente es Investigador del CONICET y forma parte del Grupo de Teorías Cuánticas Relativistas y Gravitación del IAFE. Hizo estadías en el Departamento de Teorías de Campos y Gravitación del Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la dirección del Dr. Daniel Sudarsky, y mantiene colaboraciones desde 2012. Trabaja en cosmología observacional, modelos de energía oscura y cosmología inflacionaria. Es coordinador del área de divulgación del IAFE y preside las actividades del grupo de aficionados a la astronomía CAIFA.