

PRESENTACIÓN

POR JAVIER PÉREZ CASTELLS

Es difícil conocer personas tan polifacéticas como Manuel Alfonso. Es un doctor ingeniero en telecomunicación e informática, que ha trabajado en la industria y ha sido profesor de diversas universidades. Como investigador, es autor de numerosos trabajos sobre vida artificial. Pero, además, lleva una vida enormemente fecunda como escritor de libros de divulgación científica y novelas históricas, de ciencia ficción, misterio y fantasía. La conjunción de su rigor científico y precisión matemática, con su interés humanístico, le convierte en un escritor tremendamente riguroso y claro, capaz de explicar las ideas más complejas de la manera más sencilla y concisa.

Ha construido su propia cosmovisión, perfectamente ajustada, como las piezas de un puzle, en la cual la ciencia explica cómo funciona y ha evolucionado el mundo hasta ser como lo conocemos hoy, en un relato que encaja a la perfección con la visión cristiana de la creación. La idea de la compatibilidad entre la ciencia y la fe es quizá el hilo conductor de casi toda su obra literaria. Sus ideas le han llevado a fajarse en no pocas batallas dialécticas con personas ateas y agnósticas que jamás ha rehuído y de las que suele salir enormemente airoso. Sus argumentos para desmontar las acusaciones burdas que se hacen a veces a los creyentes y a la fe, son siempre contundentes y precisos. Si siempre es entretenido y edificante leer sus escritos, a veces, lo es más, leer las réplicas a las contestaciones críticas por parte de personas con ideología materialista.

Manuel lleva muchos años desarrollando sus ideas en un blog de divulgación científica en el que se pueden encontrar, desde listas de novelas de ciencia ficción recomendadas o anécdotas personales de su dilatada trayectoria científica, a curiosidades sobre cosmología, física, matemáticas, química o evolución biológica. Y todo escrito siempre de forma amena, precisa y ordenada. El orden es una de sus características más sobresalientes y Manuel gusta mucho de las enumeraciones, demostrando una clara vis didáctica. Considero que los alumnos que ha tenido a lo largo de los años han sido enormemente afortunados.

Personalmente, Manuel me ha iluminado en varios aspectos que hoy forman parte de mis creencias más íntimas. Por ejemplo, sus teorías acerca de cómo Dios puede actuar en este mundo de forma imperceptible, sin saltarse ninguna ley física, las encuentro plenamente acertadas y me han servido en mis estudios sobre el libre albedrío. Sus fuertes convicciones acerca del futuro de la inteligencia artificial son, por una parte tranquilizadoras, pero además nos han servido mucho para aclarar las características tan especiales que tiene la materia viva, muy probablemente imposibles de replicar en sustratos fabricados con materiales distintos a los orgánicos, de los que está hecha la vida. Y así podríamos continuar con muchos otros ejemplos que me permiten afirmar, como conclusión, que leer y escuchar a Manuel es un lujo y una suerte. Porque regala una de las cosas más valiosas en la vida: el aprendizaje.

Manuel Alfonseca nos presenta en este libro una selección de artículos de sus blogs ordenados por temas. El hilo conductor es el relato de la creación. Comenzando por la aparición del universo, en la que se extiende más, dada su experiencia y conocimiento en este tema, pasando por el origen de la vida y la evolución, para terminar en concepciones antropológicas sobre el ser humano. Tras ello vuelve su mirada hacia el supuesto conflicto entre ciencia y fe, agrupando un conjunto de artículos en los que se da respuesta a esta falsa diatriba. Por el camino se detiene en

tratar la cuestión de la inteligencia artificial, tema favorito del autor, y dedica un buen número de capítulos a mirar al futuro de una forma optimista a la vez que sin olvidar que todo, inclusive el relato de la creación, tendrá un final. El libro concluye con unas pertinentes reflexiones sobre los límites de la ciencia, hoy día considerada por muchos como única fuente del conocimiento, en la exacerbación de lo que llamamos cientifismo.

No puedo más que recomendar vivamente la lectura de este libro que es asequible a cualquier persona, por escasa que sea su formación científica. Su lectura garantiza entretenimiento, aprendizaje, y sobre todo iluminación, palabra que vuelvo a repetir aquí porque es la que me sugiere el recuerdo de muchas charlas oídas a este prolífico autor.

PRÓLOGO

POR JULIO A. GONZALO

Al principio, la ciencia y la filosofía eran indistinguibles. La ciencia, que incluía la física y la filosofía natural (lo que ahora llamamos biología), era una de las divisiones de la filosofía, junto con la lógica (las reglas del razonamiento), la epistemología (la teoría del conocimiento), la metafísica (las grandes preguntas sobre la naturaleza de la realidad), la ontología (el estudio de los seres, sus actos y sus relaciones), la psicología (cómo pensamos y nos comportamos) y la ética (el bien y el mal, la filosofía práctica o moral).

En Grecia, la filosofía precedió en varios siglos a la ciencia. La primera persona que puede ser considerado científico en el sentido moderno (Aristóteles), y que también fue el más grande de los filósofos griegos, fue el último de una larga serie de filósofos anteriores, algunos tan conocidos e importantes como Pitágoras, Sócrates y Platón.

Después de Aristóteles, varios grandes pensadores griegos (como Euclides o Ptolomeo) se dedicaron principalmente a la ciencia, pero siempre se consideraron filósofos. Incluso en el siglo XVII, Roger Bacon, que dio forma al método científico, es difícil de clasificar en la ciencia o en la filosofía.

La diferencia entre las dos ramas del conocimiento ha ido creciendo desde el siglo XVII hasta nuestros días. En el siglo XVIII estaban claramente separadas. La ciencia se asoció con la experimentación y la observación del mundo material, y su desarrollo dio lugar a la revolución tecnológica. La filosofía se equiparaba con frecuencia a cuestiones metafísicas, que no tenían una aplicación tan inmediata.

El problema es que muchos científicos siguieron haciendo filosofía sin ser conscientes de ello. Habían perdido el contacto con su tema madre, hasta el punto de no poder reconocerlo. En su ignorancia, cometieron errores sorprendentes, que eran bien conocidos por los filósofos desde hace dos milenios y medio.

Para ver algunos ejemplos de esto, reproduzcamos algunas de las palabras de Stanley Jaki en *Dios y los cosmólogos* («God and the cosmologists», pp. 124-26, 130-31, Real View Books: P. O. Box 1793, Fraser, Michigan, 1998, publicado por primera vez en 1989):

Si Heisenberg se hubiese dado cuenta de las limitaciones intrínsecas de los métodos de la física, no habría dicho que la incapacidad del físico para medir la naturaleza con exactitud es muestra de la incapacidad de la naturaleza para actuar con exactitud. Le habría bastado un mínimo de sensibilidad filosófica para que se diera cuenta de que la verdad aparente de la afirmación anterior se debía a que había considerado exactamente el mismo mundo bajo dos significados diferentes: uno operativo, el otro ontológico.

Su confusión acerca de esos dos significados le hizo caer en esa falacia elemental que los griegos de antaño llamaron metabasis eis allogenos. Esa falacia se señalaba como es debido en los cursos de introducción a la lógica que formaban parte del currículo de filosofía, sin los cuales no se podía conseguir el título de doctor en ninguna materia en las universidades alemanas cuando Heisenberg recibió el suyo en física en 1925...

Aunque Einstein, en su larga disputa de tres décadas con Max Born, salió a menudo en defensa de la realidad, nunca percibió qué era lo que realmente estaba defendiendo. Tampoco es probable que se lo hubieran dicho tan directamente como lo hizo W. Pauli, cuando le planteó el asunto a Born en una carta escrita el 31 de marzo de 1954, desde un despacho muy próximo al de Einstein en el Instituto de Ciencias de Estudios Avanzados de Princeton.

El argumento de Einstein en favor de una realidad que existe aunque no se observe no son más que frases y gestos gráficos. Hasta el final creyó que lo que él entendía por causalidad ontológica, aunque nunca la lla-

mó así, sólo podía salvarse si las mediciones perfectamente precisas eran posibles, al menos en principio. El fracaso principal de sus famosos experimentos mentales con un reloj en una regla de resorte no fue que no funcionaran, sino que reducía lo ontológicamente exacto a lo exactamente mensurable. Por supuesto, él no podía esperar que Bohr, que refutó ese experimento mental, le señalara esa reducción, ya que para Bohr era fundamental evitar cualquier referencia a la ontología como tal.

Este libro trata de arrojar algo de luz sobre la diferencia entre ciencia y filosofía, diferenciando cuándo los científicos hacen ciencia y cuándo hacen filosofía. Para ello, el libro hace un recorrido por la evolución del universo, partiendo del *Big Bang* siguiendo las teorías cosmológicas actuales. Luego sigue la aparición de la vida en la Tierra, cuando la evolución cósmica comenzó a utilizar nuevas herramientas y procedimientos, como la selección natural. Después aborda cuestiones relacionadas con el futuro del universo y su previsible final. A continuación analiza cuestiones relacionadas con el impacto de la ciencia sobre la fe y el ateísmo. Finalmente, hace algunas consideraciones sobre la ciencia en general.

¿Podrán la ciencia y la tecnología modernas sobrevivir mucho tiempo, cuando sus fundamentos metafísicos, epistemológicos y de sentido común parecen estar entrando en descomposición moral? No está claro.

Manuel Alfonseca es un científico español y profesor de reputación internacional y espero que este libro sea una lectura convincente para cualquier persona interesada en la Cosmología y la Evolución.

INTRODUCCIÓN



Al principio de su libro *El Gran Diseño*¹, Stephen Hawking dice esto:

La filosofía ha muerto... Los científicos se han convertido en los portadores de la antorcha de los descubrimientos en nuestra búsqueda del conocimiento.

Aunque la mayor parte del libro es divulgación científica e historia de la ciencia, es irónico que plantee una sola aportación original (el realismo de modelos), que es pura filosofía.

En su libro *El Espejismo de Dios*², Richard Dawkins ofrece un argumento para demostrar que «es muy probable que Dios no exista». Llama a este argumento «el 747 definitivo». Este es un resumen del argumento:

1. Para explicar un Boeing 747 hay que postular que hubo diseño.
2. El diseñador (el hombre) es más complejo que el 747, y su existencia también necesita explicación (la selección natural).
3. Nuestro universo es muy poco probable (menos que un 747). Si fue diseñado, el diseñador ha de ser más complejo que el universo, y por tanto menos probable aún.
4. Luego no es probable que Dios exista. Y en caso de que existiese, ¿quién habría creado a Dios? Entraríamos en una regresión infinita.

1 Stephen Hawking, L. Mlodinow, *The Grand Design*, 2010.

2 Richard Dawkins, *The God Delusion*, 2006.

¿Por qué no funciona este razonamiento? Porque tiene una premisa oculta: supone que el diseñador del universo (Dios) está sujeto a las mismas restricciones que cualquier objeto físico: estar hecho de materia, ser contingente, y tener principio y causa. Por eso habla de complejidad (que implica materialidad), probabilidad de existencia (que implica contingencia), y le exige causa y principio (¿quién lo habría creado?). Ese no es, ni ha sido nunca, el Dios del Cristianismo.

Un Dios necesario, inmaterial y sin principio ni causa no es menos probable que el universo. De hecho, si postulamos que ese Dios existe y creó el universo, éste se vuelve automáticamente mucho más probable, porque un Dios creador habría diseñado precisamente un universo como el nuestro, que haga posible la vida inteligente, en lugar de uno carente de interés, que recaiga rápidamente en la inexistencia.

Dawkins está tratando de engañar a sus lectores. Parte de una definición implícita de Dios que se ha inventado, que no coincide con el Dios de ninguna religión, razona que ese dios es muy poco probable, y saca la consecuencia de que cualquier idea de Dios es igualmente improbable. Es un caso claro de lo que los filósofos llaman la «falacia del hombre de paja»³. El argumento del 747 dista mucho de ser definitivo, pero como Dawkins parece tan ignorante como Stephen Hawking sobre los principios elementales de la lógica y la filosofía, no creo que se dé cuenta de su debilidad.

¿Por qué pasa esto? Porque muchos científicos han llegado a la siguiente conclusión errónea: «Soy científico y, por lo tanto, todo lo que yo hago es ciencia».

No todos los científicos caen en esta trampa. Por ejemplo, Arthur Eddington, que se hizo famoso porque en 1919, con motivo de un eclipse solar, organizó la expedición que demostró que la luz se desvía al pasar cerca de una estrella (una de las predic-

3 *Straw man* en inglés.

ciones de la teoría de la Relatividad General de Einstein). Se decía de Eddington que era una de las tres personas que entendían la relatividad general en todo el mundo. Además, Eddington fue un pionero que investigó sobre el origen de la energía de las estrellas: fue el primero en proponer que provenía de la fusión del hidrógeno para formar helio.

En su libro de 1928 *The Nature of the Physical World*, que recopila las conferencias Gifford que impartió en Edimburgo, Eddington distingue perfectamente entre ciencia y filosofía. Es sorprendente e inquietante que en casi un siglo desde que se publicó este libro, esta distinción tan importante se haya perdido, tal vez como consecuencia del divorcio entre los estudios humanísticos y los científicos en la escuela. Los científicos de hoy no saben casi nada de filosofía y se equivocan en cuanto tratan de hacerla (a menudo ni siquiera se dan cuenta de que la hacen), mientras que muchos filósofos saben poco sobre ciencia. Por eso es tan importante la rama llamada «filosofía de la ciencia», uno de cuyos pioneros fue Eddington.

Mucho de lo que hacen los científicos no es ciencia; es filosofía. O algo peor, pues con frecuencia caen en falacias bien conocidas. En este libro intentaré mostrar la diferencia entre ambas disciplinas describiendo lo que sabemos y lo que podemos inferir sobre nuestro universo en evolución.

1. ¿EXISTE EL UNIVERSO?

Esta pregunta no es científica, sino filosófica. Pero el avance de la ciencia la ha puesto en el primer plano, lo que demuestra que ciencia y filosofía están a veces tan interrelacionadas, que es difícil diferenciarlas. Intentémoslo.

La Wikipedia define así el universo:

El universo es la totalidad del espacio y del tiempo, de todas las formas de la materia, la energía y el impulso, y las leyes y constantes físicas que las gobiernan. Sin embargo, el término también se utiliza en sentidos

contextuales ligeramente diferentes y alude a conceptos como cosmos, mundo o naturaleza. Su estudio, en las mayores escalas, es el objeto de la cosmología, disciplina basada en la astronomía y la física, en la cual se describen todos los aspectos de este universo con sus fenómenos.

Antes de aplicarse al universo, la palabra griega *cosmos* significaba «orden» y «belleza». Obsérvese que este sentido se mantiene en una de sus derivadas, la palabra «cosmética». La palabra latina *mundus* tiene también los dos significados: como sustantivo, «el mundo», la totalidad. Como adjetivo, «limpio, aseado, elegante». Es de suponer que el primer sentido lo copió de Grecia, y para traducir cosmos adoptaron la misma palabra que representaba en latín el otro significado. Finalmente la palabra «naturaleza» (*physis* en griego) se refiere más bien a los fenómenos: más que al universo, se refiere a lo que ocurre en él. De esta palabra provienen «física» (estudio de la naturaleza) y «metafísica» (más allá de la física).

Las primeras civilizaciones (Mesopotamia y Egipto) no tenían el concepto del universo. Cuando querían expresar la totalidad, lo hacían enumerando sus partes: el cielo, los fenómenos meteorológicos (la región del aire), las aguas, la tierra y lo subterráneo. O simplemente decían (como en el capítulo primero del Génesis) «los cielos y la Tierra». Con la palabra *cosmos*, los griegos fueron los primeros en designar la totalidad de lo que existe con un término único. Pero durante algún tiempo quedó la duda sobre si este término tenía realmente un referente, o si desempeñaba el papel de «un cajón de sastre, una acumulación de objetos sin ninguna relación entre sí».

Tradicionalmente se suele decir que el *Timeo* de Platón es el tratado de cosmología más antiguo de la historia, pues describe cómo es el cosmos, en contraposición con las cosmogonías más antiguas, a las que sólo interesa su origen. Veamos una cita curiosa del *Timeo*:

El cosmos es, en efecto, la cosa más bella que se ha producido y su creador la mejor de las causas. El universo así engendrado ha sido, pues, formado según el modelo de la razón, de la sabiduría y de la esencia inmutable, de donde se deduce como consecuencia necesaria que el universo es una copia.

Algunos siglos más tarde, Ptolomeo propuso su modelo del universo, que duró más de mil años. En este modelo, como en el de Platón, el cosmos es un objeto físico cuya existencia no se pone en duda. El universo de Newton es también un todo coherente, un objeto físico con un espacio y un tiempo absolutos, cuyo comportamiento se puede describir por completo merced a la «teoría de la gravitación universal».

Sólo a partir del siglo XIX se pone en duda la existencia del universo. La cuestión surgió como reacción al siguiente silogismo:

1. Todo objeto físico tiene una causa.
2. El universo es un objeto físico.
3. Luego el universo tiene una causa.

Este argumento equivale a la segunda vía de Santo Tomás de Aquino para demostrar la existencia de Dios. Como es lógico, los pensadores ateos del siglo XIX no podían aceptar este razonamiento, y como no se atrevieron a negar el principio de causalidad (la «premisa mayor» del silogismo), atacaron la «premisa menor», negando la existencia del universo como objeto físico. ¿Qué sería entonces «el universo»? Una palabra sin referente, un término que designa «el conjunto de todas las cosas», pero ese conjunto no existiría, sólo existirían las cosas. De esa forma, el silogismo anterior sería sustituido por el siguiente:

1. Todo objeto físico tiene una causa.
2. El universo no es un objeto físico.
3. Luego el universo no necesita una causa.

Hacia 1915, cuando Einstein presentó la teoría de la Relatividad General, formuló una ecuación cosmológica, que como indica su nombre se aplica al universo entero, una de cuyas formas es esta:

$$R^2 = \frac{2GM}{R} - kc^2 + \frac{\Lambda}{3}c^2R^2$$

Pero la existencia de esta ecuación implica que «el universo tiene que ser un objeto físico», porque las ecuaciones de la física se aplican a objetos físicos. Luego la premisa menor del primer silogismo es cierta, contra lo que decían los ateos decimonónicos. En consecuencia, el ateísmo se ha visto obligado a negar la premisa mayor, es decir, el principio de causalidad. De ahí vienen afirmaciones como esta: «Aunque el universo es un objeto físico, puede haber surgido sin causa, como una fluctuación cuántica del vacío».

Para decir esto, los físicos ateos se apoyan en una consecuencia del principio de incertidumbre de Heisenberg, que en una de sus formas puede expresarse así:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

Esto significa que un objeto con energía ΔE puede aparecer espontáneamente a partir del vacío durante un tiempo $\Delta t < \hbar/(2\Delta E)$. Estos objetos se llaman «partículas virtuales», que duran un tiempo ridículamente pequeño. Un electrón virtual, por ejemplo, duraría sólo $1,3 \times 10^{-21}$ segundos (poco más de una miltrillonésima de segundo). Y cuanto más masa y energía tenga la partícula virtual, menos tiempo durará. Debido a su corta duración, la existencia de las partículas virtuales no ha podido comprobarse.

Para que el universo (que se cree existe desde hace 13.800 millones de años) pueda ser una fluctuación cuántica, «su energía tiene que ser cero». Por eso, puesto que el universo contiene una cantidad enorme de materia y de radiación, los físicos ateos bus-

can algo que pueda compensarla de algún modo. Algunos dicen que quizá la «energía oscura» (que no sabemos lo que es, si es que es algo) resulte ser una energía negativa, y quizá su valor compense exactamente el de toda la materia y la energía que sí sabemos que existen, para que la suma total de energía del universo sea cero, porque de lo contrario todo su razonamiento se vendría abajo. A estas elucubraciones, algunos las llaman ciencia.

2. RELATIVIDAD GENERAL: EL ERROR DE EINSTEIN

Cuando Einstein formuló en 1915 la teoría de la Relatividad General, no tardó en aplicarla al universo entero, obteniendo la ecuación cosmológica que vimos en el apartado anterior. Es curioso que esta ecuación sea idéntica a la ecuación que se obtendría a partir de la teoría de la gravitación de Newton. Tan sólo hay una diferencia entre las dos: la constante k representa, en el caso de Newton, la energía total del universo; en el caso de Einstein, su curvatura.

Cada término de esta ecuación contiene una constante universal. Aparte de k , G es la constante gravitatoria; Λ es la llamada constante cosmológica, cuya interpretación no está muy clara. Inicialmente Einstein pensó que podría eliminar ese término de la ecuación haciendo $\Lambda=0$. Así la ecuación se simplifica y es posible resolverla analíticamente. Entonces descubrió que la solución, en ese caso, era un cosmos en expansión continua. Como él creía que el universo tenía que ser estacionario, decidió asignarle a Λ un valor crítico Λ_c , para conseguir que lo fuera. Desgraciadamente para Einstein, pocos años después se descubrieron dos cosas:

1. Que el universo está en expansión (Lemaître y Hubble).
2. Que el universo de Einstein con $\Lambda=\Lambda_c$ es estacionario, pero no estable. Cualquier variación mínima lo haría entrar en expansión indefinida o en contracción hasta alcanzar un volumen nulo.

Cuando se dio cuenta de ello, Einstein dijo que «introducir la constante cosmológica había sido el gran error de su vida». Sin embargo, al descubrirse en 1998 la expansión acelerada del universo, los cosmólogos han vuelto a introducirla para explicar este fenómeno, y hacen corresponder el tercer término de la ecuación de Einstein con la misteriosa «energía oscura».

El problema es que no sabemos qué es la energía oscura. Si existe (lo que no está demostrado) probablemente será una nueva interacción fundamental del universo, aparte de las cuatro que conocemos. Sería una novedad tan grande como el descubrimiento de la radiactividad a finales del siglo XIX: se abriría un campo nuevo para la física. Además, su valor parece ser muy pequeño, muy próximo a cero, lo que no cuadra con las teorías de campos cuánticos que han tratado de explicarla a través de la energía del vacío, pues le atribuyen un valor 10^{120} veces más alto, en lo que M. P. Hobson y sus colegas han llamado la peor predicción teórica de la historia de la física. Más adelante volveremos sobre esto.

En conclusión, tenemos dos posibilidades:

1. Si la energía oscura no existe, si la expansión acelerada del universo fuese un artefacto o pudiera explicarse de otro modo (hay físicos que están analizando las dos posibilidades), es posible que Einstein tuviera razón cuando dijo que «introducir la constante cosmológica había sido el gran error de su vida».
2. Pero si la energía oscura existe de verdad y la constante cosmológica tiene el valor que el modelo estándar le atribuye (10^{-52} m^{-2}), entonces el error de Einstein habría sido decir la frase citada en el párrafo anterior.

3. MEDIDA DE LA CONSTANTE GRAVITATORIA

En 1798, el físico-químico inglés Henry Cavendish fue el primero en medir la «constante de gravitación universal» (G) de Newton utilizando un método espectacularmente ingenioso, que ape-

nas ha sido mejorado desde entonces. El método fue ideado por John Michell, quien murió sin conseguir llevarlo a cabo, siendo Cavendish quien realizó el experimento. En realidad, su objetivo no era medir la constante, sino la masa de la Tierra, pero el valor de la constante podía deducirse del resultado.

El instrumento de Cavendish era una «balanza de torsión» de la que colgaban dos bolas de plomo idénticas. Junto a ellas, una a un lado y otra al otro, se colgaban otras dos esferas de plomo mucho más grandes, de 175 kg cada una, que al atraer a las dos primeras producían una ligera torsión de la balanza, que Cavendish pudo observar mediante un pequeño telescopio situado fuera del recinto, para evitar interferencias del observador. Así detectó un desplazamiento de sólo 4 mm, que midió con una precisión de $\frac{1}{4}$ mm. Esto le permitió calcular que la densidad de la Tierra era 5,448 veces mayor que la del agua, de donde se pudo deducir la masa de la Tierra y el valor de G:

$$G=6,674 \times 10^{-11} \text{N.m}^2/\text{kg}^2$$

Este es el valor oficial, que se conoce con una «exactitud» bastante baja (1 en 10.000), en comparación con otras constantes universales.

El experimento de Cavendish se sigue utilizando para medir la constante de gravitación universal. Recientemente, dos experimentos realizados en China por un equipo dirigido por Luo Jun, utilizando bolas de acero y cámaras de vacío para prevenir interferencias, ha obtenido los siguientes resultados:

$$G=6,674184 \times 10^{-11} \pm 11,64 \text{ ppm}$$

$$G=6,674484 \times 10^{-11} \pm 11,61 \text{ ppm}$$

donde ppm significa partes por millón. La «incertidumbre» de los resultados de estos dos experimentos es la más baja que se ha obtenido hasta ahora al medir G.

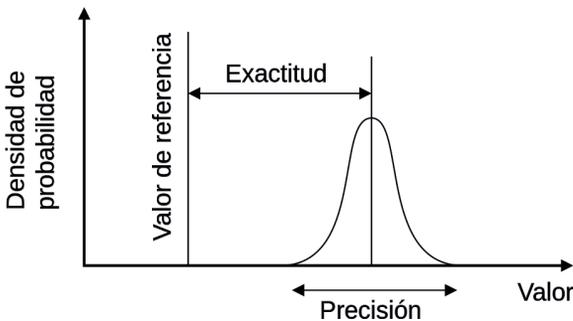
El valor aceptado hasta entonces para G, basado en los experimentos realizados durante los últimos 40 años, es este:

$$G=6,67408 \times 10^{-11} \pm 47 \text{ ppm}$$

Los dos valores obtenidos en los nuevos experimentos se encuentran, por tanto, ligeramente por encima del valor generalmente admitido, pero tienen una incertidumbre mucho más pequeña (unas 4 veces menor). La mínima incertidumbre que se había obtenido anteriormente entre todas las medidas realizadas (ha habido muchas) fue de 13,7 ppm, sólo un poco peor que la de los nuevos experimentos. En comparación, la incertidumbre del experimento de Cavendish fue del 1%.

Para entender lo que significan estos números, debemos recordar que en las mediciones se utilizan tres conceptos estadísticos diferentes:

- *Exactitud*: distancia entre el valor medido y el valor real.
- *Precisión*: capacidad de un instrumento de dar los mismos resultados en mediciones diferentes.
- *Incetidumbre*: Si se aplica a un instrumento, se habla de **incertidumbre de calibración**. Si se aplica a **una medida concreta**, mide la dispersión de los valores obtenidos al realizar varias veces el mismo experimento.



EXACTITUD Y PRECISIÓN DE UNA MEDIDA