

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

Doble Máster en Formación del Profesorado y Filosofía y Cultura Moderna



## *EL CONCEPTO DE TIEMPO EN LA COSMOLOGÍA CONTEMPORÁNEA*

Alumno: Fernando Raúl Rosado Carmona

Tutora: María de Paz Amérigo

Facultad de Filosofía, Universidad de Sevilla

Año 2023



## **FACULTAD DE FILOSOFÍA [UNIVERSIDAD DE SEVILLA]**

Doble Máster en Formación del Profesorado y Filosofía y Cultura Moderna

**TÍTULO:** El concepto de tiempo en la cosmología contemporánea.

**AUTOR:** D. Fernando Raúl Rosado Carmona.

**TUTORA:** Dr. Dña. María de Paz Amérigo.

**DEPARTAMENTO:** Filosofía y Lógica y Filosofía de la Ciencia.

**RESUMEN:** La cosmología moderna nos ha obligado a reevaluar el concepto de tiempo. Las investigaciones de Hubble, las aportaciones teóricas de Lemâitre, la relatividad de Einstein y una gran dosis de ingenio por parte de la comunidad científica, derivaron en lo que hoy conocemos como universo en expansión. Bajo los parámetros físicos de esta inflación, el tiempo adquiere un papel protagonista. Pero, lejos de poder solucionar los problemas tradicionales, la cosmología moderna abrió nuevas líneas de estudio: físicas, antropológicas y, por supuesto, filosóficas. Hace décadas, los viajes en el tiempo o la dilatación temporal eran considerados temas propios de la ciencia ficción, hoy, sin embargo, son asuntos que la ciencia y la filosofía se toman muy en serio.

**ABSTRACT:** Modern cosmology has forced us to reevaluate the concept of time. The investigations of Hubble, the theoretical contributions of Lemâitre, Einstein's theory of relativity, and a great deal of ingenuity on the part of the scientific community have led to what we know today as an expanding universe. Under the physical parameters of this inflation, time has a leading role. However, far from being able to solve traditional problems, modern cosmology has opened up new lines of study: physical, anthropological, and, of course, philosophical. Decades ago, time travel or temporal dilation were considered topics of science fiction, but today they are issues that science and philosophy take very seriously.

**PALABRAS CLAVE:** Tiempo, cosmología, filosofía, inflación, relatividad.

**KEY WORDS:** Time, cosmology, philosophy, inflation, relativity.

<b>1 Introducción</b>	2
<b><u>BLOQUE I</u></b>	
<b>2 Concepciones tradicionales acerca del tiempo</b>	5
2.1 El tiempo propio del ser humano	5
2.2 El tiempo escatológico	7
2.3 El arte como alternativa al tiempo tradicional	8
2.4 Concepto polisémico	10
<b>3 Galileo y Newton: el origen de la relatividad</b>	10
<b>4 Maxwell y Lorentz: el electromagnetismo</b>	13
<b>5 Einstein y Minkowsky: la relatividad</b>	16
5.1 La relatividad especial	17
5.2 La relatividad general	19
5.3 El eclipse que dio la razón a Einstein	22
<b>6 Hubble y Lemâitre: el Big Bang</b>	24
6.1 El átomo primigenio	26
<b>7 La formalización matemática de la inflación</b>	28
<b>8 El proceso inflacionario</b>	30
8.1 La cronología del Big Bang	32
<b><u>BLOQUE II</u></b>	
<b>9 La complejidad de la actual cosmología</b>	35
<b>10 El tiempo ‘antes’ de la singularidad</b>	36
<b>11 La dilatación temporal</b>	40
11.1 la dilatación por velocidad	40
11.2 La dilatación temporal gravitacional	43
<b>12 Los viajes a través del tiempo</b>	44
<b>13 La flecha del tiempo</b>	47
13.1 La flecha termodinámica	47
13.2 La flecha psicológica	48
13.3 La flecha cosmológica	49
13.4 La flecha religiosa	49
<b>14 Los debates acerca de la naturaleza del tiempo</b>	52
<b>15 Conclusiones</b>	55
<b>16 Bibliografía</b>	57

*A mis compañeras y compañeros del doble máster del profesorado y filosofía.*

*Qué fortuna la mía al encontraros en el camino.*

## 1. INTRODUCCIÓN

“*Sé bien lo que es el tiempo, si nadie me lo pregunta; pero si debo explicarlo a quien me lo pregunta, entonces no lo sé*”. Con esta curiosa cita, Agustín de Hipona puso de manifiesto en su obra *Meditaciones* la dificultad que representa para el ser humano ofrecer una definición precisa sobre el concepto de tiempo. Dieciséis siglos después, continuamos estancados en la misma problemática.

El tiempo es el primer dilema de la filosofía y está presente en todas sus corrientes y tradiciones, lo demás llega por añadidura. El pensador griego clásico detectó una aporía entre el *ser* (aquello común e invariable a todas las entidades presentes en el cosmos) y el *cambio* que percibimos constantemente en la naturaleza. El paso del tiempo condiciona y altera las cosas del mundo, pero el *ser* permanece siempre inalterable con respecto a este. Las explicaciones míticas se mostraron insuficientes o, cuanto menos, poco convincentes a la hora de resolver este problema, la filosofía decidió entonces explorar otras vías de investigación recurriendo a un pensamiento racional, articulado y justificado. La lista de motivos que se han ofrecido históricamente para intentar mediar entre estos dos conceptos es inagotable: la apariencia de Parménides, las cualidades de Empédocles, el mundo de las ideas de Platón o la unidad indeterminada hegeliana son algunos de ellos. Así, el tiempo ganó la medalla de oro en el podio de problemas de la filosofía.

Estudiar su problemática representa uno de los más dignos desafíos para el intelecto humano, tanto por su complejidad, como por la polisemia que el propio concepto lleva aparejada. Ya sea desde nuestra disciplina, o desde otras como la historia, la psicología o la física, el ser humano ha intentado en infinitas ocasiones desarrollar una estructura que permitiese comprender y arrojar luz sobre este concepto.

Este Trabajo de Fin de Máster no tiene, ni mucho menos, la elevada pretensión de resolver el problema. Nuestra intención se limita únicamente a realizar una aproximación didáctica hacia este concepto y la forma en que se comprende hoy desde la cosmología contemporánea. La relevancia de este estudio no radica en las aportaciones innovadoras u originales que podamos hacer, sino en el hecho de que, filosóficamente, supone una útil herramienta para cualquier estudiante o autodidacta que quiera iniciarse en la investigación del tiempo y busque, por denominarlo de alguna manera, un compañero de viaje.

El presente trabajo se estructura en base a dos grandes bloques, coordinados ambos en torno a diferentes planteamientos:

- 1) Bloque I: Partimos del estado actual de la cuestión. Para ello, realizaremos una aproximación a la forma en que diferentes disciplinas entienden el tiempo y, por supuesto, a la manera en que cotidianamente nos relacionamos con él. Estas incursiones teóricas distan mucho de la comprensión física que la cosmología contemporánea tiene acerca de este concepto, por lo que estudiaremos los avances físicos, geométricos y matemáticos que han desplegado y consolidado su actual ontología. Para organizar este gran bloque, presentaremos a cuatro parejas de autores: Galileo – Newton, Maxwell – Lorentz, Einstein – Minkowsky y, finalmente, Hubble - Lemaître; lo que no es impedimento para que, de forma sucinta, hagamos referencias a otros como Leavitt o Hawking.
- 2) Bloque II: El segundo gran bloque se articula en torno a los diferentes problemas que de lo anterior se pueden derivar. Por ejemplo: el tiempo antes, durante y después de la singularidad, la manera en que este se entiende bajo el prisma relativista, cómo se construye la cuarta dimensión, y, en otro orden de cosas, si es posible imaginar un tiempo sin espacio o qué ocurrirá con esta entidad física al final de la vida del cosmos. Se trata, como puede apreciarse, de una serie de cuestiones íntimamente relacionadas.

Es posible afrontar este trabajo desde distintas metodologías, no obstante, dado el carácter descriptivo del estudio, así como la necesidad de descomponer el tema principal en asuntos más ligeros y delimitados, hemos orientado nuestra actividad hacia un estilo analítico. Siguiendo los pasos de este método de investigación, nos resulta posible exponer la cuestión fundamental del problema, extraer ideas que podemos sintetizar y esquematizar, compararlas y, finalmente, articular una visión general que nos permita conectar las diferentes realidades del asunto que, en principio, podíamos considerar aisladas.

Por otro lado, la bibliografía que manejaremos es extensa y mayormente de corte científico-filosófico. Es conveniente aclarar que mucha de la información que nos ayudó en la elaboración de este trabajo tiene su origen en páginas web especializadas, en revistas o artículos de divulgación científica e, incluso, en los apuntes recogidos durante las sesiones de clase del grado y máster de filosofía de los últimos años. Otro aspecto a reseñar es la utilización de varias imágenes que se incluyen con doble intención: en primer lugar, clarifican y enriquecen el contenido del texto; en segundo, son el complemento perfecto para que los conceptos puedan ser fácilmente visualizados por el lector.

Finalmente, quisiéramos indicar que este estudio guarda estrecha relación con el Trabajo de Fin de Grado que presentamos el pasado año. No debe considerarse como una continuación, pues no es esta la idea, sino, más bien, una ampliación de las cuestiones allí presentadas. Durante los meses en que se

desarrolló el Trabajo de fin de Grado del 2022, apareció un problema interesante pero que no fue posible explorar adecuadamente en aquel momento: el tiempo y sus derivas cosmológicas. Se acordó, en consecuencia, que se trataba de un asunto que podría sondearse con detalle en futuros proyectos. Y de ahí, la principal motivación que impregna esta investigación.

Aprovechamos la ocasión para agradecer a la Universidad de Sevilla en general, y a la Facultad de Filosofía en particular, el fantástico despliegue de recursos académicos y humanos que han puesto a disposición de los alumnos del Máster de Filosofía y Cultura Moderna durante el presente curso. Si la filosofía tiene un lugar al que pueda llamar hogar, ese es, sin duda, esta Facultad.

## **2. CONCEPCIONES TRADICIONALES ACERCA DEL TIEMPO**

A grandes rasgos, el tiempo es una magnitud física que nos permite separar y medir los fenómenos que podemos observar en el universo, ya se trate de una supernova o del inicio de un partido de tenis. Gracias a esta magnitud física, resulta posible establecer diferentes bandas de acontecimientos según se hayan producido antes (pasado) o después (futuro) del ahora (presente)

Dado que el tiempo opera, invariablemente, sobre todas las áreas de influencia del ser humano, hemos buscado incansablemente una estructura común a este concepto que resulte igualmente válida para todas ellas. Pero se nos antoja una tarea imposible en tanto el tiempo, en su definición más básica de progresión cronológica, no es entendido igual por la física que por la antropología. Cuando pensamos, por ejemplo, en la belleza, encontramos que se trata de un término que abarca ciertas características generales como el orden, lo visualmente agradable y la sencillez. Sin embargo, la belleza para un matemático tiene mucho que ver con la simplicidad en las ecuaciones, mientras que para un artista se relaciona con la capacidad de despertar algún tipo de emoción. De esta misma manera, el tiempo de la física no es el tiempo de la historia humana. Igualmente, podemos decir que el tiempo psicológico es distinto en cada persona o el antropológico diferente para cada época y cultura. Los ejemplos pueden multiplicarse exponencialmente.

La idea de fondo es que el tiempo, además de una magnitud que estructura la totalidad de la existencia universal, es una esfera inherente del ser humano que articula y condiciona su vida de manera radical. Si el tiempo es uno, la forma de comprenderlo y experimentarlo es múltiple. Por tanto, lo primero que convendría hacer es un acercamiento a estas cuestiones para establecer los parámetros de estudio adecuados.

### **2.1 EL TIEMPO PROPIO DEL SER HUMANO**

Si algo define al hombre, además de su razón y virtud ética, es, como decimos, la temporalidad. Que somos tiempo, es algo que los autores existencialistas, al estilo de Heidegger, defendieron con vehemencia. La vida humana se despliega entre tiempos, en tanto tiene un inicio y un final. Ambos acontecimientos nos resultan fácilmente reconocibles por nuestra experiencia cotidiana. No podemos escapar de estos ni alterarlos en modo alguno, tan solo aceptarlos e integrarlos.

El tiempo físico que estudia la cosmología, ese tiempo en el que se suceden los acontecimientos universales y que intentamos entender bajo modelos matemáticos, no es el tiempo del hombre. Nosotros tenemos un tiempo específico del vivir diferente al resto de criaturas (Marco de Carlos, 2021). Se trata de un tiempo antropológico, ligado a la biología y el desarrollo racional del individuo. Un tiempo que es propio y personal, intransferible, limitado. Un tiempo que, a diferencia del cosmológico, se agota rápidamente.

El fin de nuestra existencia afecta a quienes nos rodean, condiciona otras realidades ajenas a la nuestra y, en ocasiones, limita nuestra capacidad de actuar. Así entendido, el envejecimiento (ese agotar el tiempo que tenemos) tiene un significado peyorativo, es sinónimo de derrota y humillación. (Marco de Carlos, 2021) El inevitable paso del tiempo, y su predecible desenlace, genera rechazo en nuestras conciencias y nos empuja a ignorar esa parte de nuestra ontología.

El tiempo cosmológico, por otra parte, parece inagotable. Es ajeno a los lamentos finitos de la humanidad, y no tiene un horizonte vulnerable. Puede resultar apabullante, pero también hipnótico e inquietante. El ser humano se mide habitualmente en comparación al cosmos, a la totalidad de la existencia; pero la naturaleza, a diferencia de nosotros, carece de punto de partida. Es cierto que la singularidad, que abordaremos con detalle más adelante, es presentada actualmente como una hipótesis coherente acerca de cómo se origina nuestro universo. Sin embargo, no podemos (por ahora) explicar cómo es que esta apareció. Por esto, Aristóteles consideraba ridículo preguntarse por el inicio del universo: simplemente estaba aquí, sin más. El nacimiento y la muerte no forman parte del orden universal que nos engloba, pero sí del diminuto microcosmos en el que vivimos cotidianamente. Razón por la cual, estas temporalidades son tan dispares entre sí. (Marín Casanova, 2021)

El concepto del desarrollo o progresión de la historia es algo propio del ser humano, que se encuentra incompleto e inacabado, en potencia, y proyecta esa inseguridad hacia el exterior en un intento de ordenar aquello que le acontece. Buscamos una finalidad, una utilidad en nuestra existencia. En cambio, el cosmos ya se encuentra en acto, constituido desde siempre en tiempo inmutable. Su tiempo carece de finalidad porque es fin en sí mismo, siempre presente y completo.

Otra razón, además de la expuesta, por la que el tiempo cosmológico y el antropológico son dispares, es la contingencia de ambas realidades:

*“El mundo de las entidades físicas observables no es libre: existe un ajustamiento radical entre causa y efecto. Las relaciones causa y efecto regulan el orden físico: a toda acción corresponde una reacción. Las ecuaciones físicas de Newton y Einstein –al menos como programas de investigación– son deterministas y, a su estoica manera, también lo son*

*las de la mecánica cuántica. A nivel macroscópico el mundo inerte es determinable matemáticamente con bastante exactitud. Podemos predecir la trayectoria de cometas y la producción de los eclipses.” (Rodríguez Valls, 2017: 172)*

El hombre, al igual que el cosmos, está sujeto a las leyes de la física. No obstante, trabaja en una pequeña parcela de autonomía de la que no gozan los objetos naturales. La piedra no puede elegir seguir una trayectoria u otra, de igual manera que Júpiter no puede dejar de orbitar el Sol cuando se le antoje. Un tiempo limitado, pero hasta cierto punto autónomo. La razón, que lleva aparejada la libertad, habilita la posibilidad de gestionar nuestra temporalidad en base a criterios diversos y particulares, sin estar limitados, radicalmente, por imposiciones externas.

Para intentar comprender o estructurar el tiempo cosmológico, esa parcela de lo real que es insondable por nosotros, recurrimos a Dios. Encontramos en su imagen el equilibrio entre ese abismo temporal y nosotros. La religión llegó para intentar domesticar el tiempo y hacerlo ligeramente más comprensible.

## 2.2 EL TIEMPO ESCATOLÓGICO

El tiempo escatológico propio de la religión considera que el cosmos pertenece a Dios, en tanto es su creación y, de forma subsidiaria, al hombre. En nuestra cultura cristiana occidental, el tiempo es establecido y medido de manera teológica. La idea de que Dios descansó al séptimo día después de dar forma al cosmos articula el imperativo del descanso del Sabbath para el judío y del domingo para el católico.

*“Así terminó Dios la creación del cielo y de la tierra y de todo cuanto existe, y el séptimo día descansó. Dios bendijo ese día y lo apartó, para que todos lo adoraran. De esta forma creó Dios el cielo y la tierra” (Génesis, 2: 2-3)*

Este tiempo teológico tiene un marcado carácter histórico, y, como decimos, es uno de los primeros intentos por organizar la cosmovisión temporal del hombre de una manera comprensible<sup>1</sup>. Cuando Dios elevó al hombre por encima del resto de criaturas, dimos la espalda al universo y nos entronizamos como centro de la creación<sup>2</sup>. De esta forma, el hombre se apropió de algo ajeno, constituyendo como suyo aquello en lo que está insertado obligatoriamente y que no puede domesticar. (Marín Casanova, 2021)

---

<sup>1</sup> De hecho, el vocablo *cosmos* procede del latín y significa *universo*. Este, a su vez, emana del término griego κόσμος (*kósmos*), que se traduce por *orden*. La antítesis sería el *caos* (Χάος), que, literalmente, significa *desorden*.

<sup>2</sup> Este es, de hecho, uno de los principales motivos que facilitaron la implantación de modelos cosmológicos geocéntricos. Después, la observación a ojo desnudo desde la Tierra y el aparente movimiento circular de una imaginaria cúpula celeste, terminaron por dar solidez a una posición eminentemente teológica.

Por este motivo, la religión se convierte en una proyección de la naturaleza finita del hombre. El infructuoso intento por imponer unas condiciones existenciales al universo y restringir, de paso, esa temporalidad inagotable. El *escatón* o fin de los tiempos, es la narración en que se despliega este escenario. Puede ser el Apocalipsis cristiano, el Ragnarök nórdico o el Yawm al-Qiyamah islámico. En cualquier caso, la escatología representa ese tiempo final, similar al del hombre, donde todo concluye en medio de un profundo caos y angustia.

La religión falló en su intento por limitar el tiempo y acercarlo a una dimensión antropológica, por convertirlo en una parte más de nuestra constitución ofreciendo una salida pacífica al conflicto. El tiempo permanece, bajo el parámetro religioso, como algo propio de Dios y a lo que no tenemos acceso.

El arte, que durante mucho tiempo caminó de la mano de lo religioso, acabó por explorar su propio camino en la comprensión de lo temporal. Buscó de manera más incisiva esa simbiosis, esa fusión entre la finitud humana y la eternidad universal que la religión no pudo articular.

### 2.3 EL ARTE COMO ALTERNATIVA AL TIEMPO TRADICIONAL

Durante el siglo XIX, comenzó a popularizarse el uso del reloj personal. Aunque ya existían relojes de bolsillo, estos resultaban caros y poco prácticos. Poco a poco, y gracias a los avances en tecnología militar, se construyeron relojes pequeños que podían llevarse en la muñeca. Posteriormente, se integraron en todas las áreas de la sociedad, desde hogares hasta fábricas. El uso del reloj facilitó la vida humana de una manera tal que pocos artilugios han resultado igual de fascinantes a lo largo de la historia. El tiempo podía medirse con precisión y compararse, abriendo el camino a nuevas interpretaciones sobre este.

Una de ellas aparece de la mano del *espiritualismo*. Esta corriente defendió que, si bien el tiempo tecnificado del reloj era útil para controlar y comprender mejor los variados fenómenos que se producen en la vida cotidiana del hombre, no lo era, en cambio, para conjugar y definir otras esferas de este como la conciencia o la memoria. Dado que nuestro *yo* se proyecta en el futuro, la medición mecánica del tiempo no resultaba apropiada. Para explicar mejor estas esferas de lo humano, era necesario recurrir a un tiempo no secuencial que pudiera abarcar desde el pasado hasta el más lejano futuro.

Quizás, el máximo exponente de esta corriente fue el filósofo francés Henri Bergson, conocido por sus discusiones con Einstein acerca de la comprensión del tiempo bajo las nociones impuestas por la relatividad. Según Bergson, la duración (o la separación en bandas de acontecimientos) es una forma

de experiencia temporal que difiere del tiempo objetivo y cuantificable de la ciencia y la matemática, especialmente del relativo de Einstein.

Bergson argumentó que la duración no podía ser medida ni dividida en segmentos precisos, ya que es una experiencia continua y fluida del ser humano. Sostenía que el tiempo de la física moderna es una abstracción que simplifica la realidad, mientras que la duración se experimenta directamente como una corriente de conciencia en constante cambio.

En cuanto a la simultaneidad, Bergson cuestionó la noción de que eventos separados en el tiempo pudiesen considerarse simultáneos, algo que Einstein sí creía poder explicar con sus investigaciones. Según él, la simultaneidad implica una sincronización artificial basada en la medición objetiva del tiempo, pero no refleja la verdadera naturaleza de la experiencia temporal. Para Bergson, la simultaneidad real se encuentra en la duración, donde todos los eventos se entrelazan y se influyen mutuamente. Volveremos con Bergson más adelante.

*"El tiempo se desliza, fluye y no puede ser contenido. Cada instante es único, irreplicable. El pasado no está muerto, sino vivo en la medida en que sigue influyendo en el presente. El futuro no es simplemente lo que vendrá, sino un campo de posibilidades que se abren ante nosotros. El tiempo, en su esencia, es duración, un fluir continuo de la vida misma."* (Bergson, 1944/2000: 98)

Por su parte, Schopenhauer escribió una conocida obra titulada *El mundo como voluntad y representación*, en la que afirmó la primacía de la *voluntad* metafísica como fundamento del ser. Allí explicó que nuestras representaciones del mundo no son más que patéticos intentos por comprender o imitar la belleza absoluta del cosmos<sup>3</sup>, o *cosa en sí*.

Para Schopenhauer, todo lo que podemos conocer está mediado o condicionado por las formas a priori kantianas del espacio y el tiempo. Por tanto, lo que conocemos es siempre una imitación o representación de la última verdad metafísica que está más allá del entendimiento. Si existe un camino que posibilite el conocimiento de la voluntad suprema, es la contemplación estética. Cuando nos abandonamos al estudio desinteresado del arte, olvidando el mundo y su corrupción, logramos una fusión con la obra y, durante un breve instante de tiempo, compartimos la eternidad de lo absoluto. Repudiamos nuestro *yo* aislado, agotado y turbado por el paso del tiempo, para transmutarnos en la idea suprema, inmutable y perfecta de lo bello. Durante la contemplación, traspasamos nuestros límites temporales y finitos para vernos inmersos en un estado sublime que, de otro modo, nos resulta imposible de alcanzar. Schopenhauer afirma también que, durante ese proceso de abstracción, dejamos

---

<sup>3</sup> Las referencias al idealismo platónico son notables.

de ser siervos de nuestra propia naturaleza cambiante e imperfecta, para convertirnos en “*intemporales sujetos del conocimiento*” (Schopenhauer, A. 2022: 110)

## 2.4 CONCEPTO POLISÉMICO

Como vemos, el concepto de tiempo es variado y polisémico, resultando casi imposible delimitar estrechamente su definición. Se trata de un asunto complejo y extenso que comprende buena parte de nuestra arquitectura ontológica. Convivimos con una idea de tiempo progresiva. La percepción de la existencia humana es siempre futurista, es decir, lanzada hacia el mañana. Constituimos nuestra historia con vista a lo que podemos hacer y, en consecuencia, hemos ordenado todo el cosmos en base a esa misma idea de finitud y longevidad. Nos encontramos cómodos bajo ese paradigma porque, entre otros motivos, es el fiel reflejo de nuestro propio desarrollo biológico y natural.

La cosmología contemporánea desplegará una nueva concepción del tiempo y el espacio a raíz de la visión que sobre estos aspectos de la realidad tendrá la relatividad. Con ella, nuestra cosmovisión también se verá alterada, obligándonos a recurrir a novedosas explicaciones acerca del origen del universo, sus leyes y todo cuanto contiene.

## 3. GALILEO Y NEWTON: EL ORIGEN DE LA REALATIVIDAD

En una obra titulada *Los físicos y Dios*, el español Eduardo Battaner escribe lo siguiente:

*“Podríamos considerar a San Agustín como el bisabuelo de la relatividad por sus ideas acerca del tiempo. Según él, no tenía sentido hablar del tiempo antes de la creación porque Dios, que lo había creado todo, también había creado el tiempo. Si ignoramos provisionalmente el lenguaje místico de San Agustín, esta idea parece concordar con la conclusión relativista de que las propiedades del tiempo dependen de la distribución de la materia (más propiamente, del tensor impulso-energía) Tampoco la relatividad nos permite hablar de tiempo antes del Big Bang”* (Battaner, 2020: 14)

No solo San Agustín realizó una aproximación a este asunto, sino que muchos otros pensadores, ya fuesen escolásticos, árabes o ateos, trataron de comprender la intrincada relación entre el hombre, el cosmos y el tiempo. Hacer referencia a todos, sin dejar a nadie atrás, sería una labor titánica que excedería por mucho la intención de este breve ensayo. Así que, amparados por esta excusa, damos un salto cuantitativo y nos detenemos en el siglo XVI. Aquí encontramos a Galileo, quien, junto a Copérnico y Kepler, conforman la triple entente científica del Renacimiento. A ella se sumará, como un aliado más, Isaac Newton.

Galileo es recordado como uno de los más influyentes científicos y pensadores de toda nuestra historia, y no es para menos. Sus hallazgos en el área de la mecánica revolucionaron la forma en que la física se relacionaba con la cosmología. Logró encontrar un equilibrio entre la investigación teórica y el experimento, traduciendo al lenguaje matemáticos sus avances. Precisamente, la incorporación del experimento como método para reconocer la hipótesis correcta en la investigación científica fue uno de sus grandes aportes a la historia. (Battaner, 2020: 40-41)

Galileo logró enunciar el principio de relatividad, aunque solo estaba restringido a ciertos experimentos en mecánica. En la obra *Diálogo sobre los dos sistemas máximos del mundo*, propone el siguiente experimento, que, de forma arriesgada, podemos señalar como el punto de partida de toda la cosmología moderna:

*“Enciérrese con algún amigo en la estancia más grande bajo la cubierta de un barco y encierre allí también un puñado de mosquitos, moscas y otros pequeños insectos. Lleva una gran artesa con agua y llénela de peces; cuelgue una botella que gotee agua en otra de cuello estrecho y colocada justo debajo. Entonces, estando el barco en reposo, observe cómo los insectos vuelan con parecida velocidad hacia todas las partes de la estancia, cómo los peces nadan indiferentemente hacia todos los lados y cómo todas las gotas caen en la botella situada debajo. Y lanzando cualquier cosa hacia su acompañante, no necesitará arrojarla con más fuerza en una dirección que en cualquier otra, siempre que las distancias sean iguales. Y, saltando a lo largo, llegará tan lejos en una dirección como en otra. [...] Después de observar todas estas particularidades, creo que nadie dudará de que mientras el barco permanezca quieto, deben ocurrir de esta manera; pero haced que el barco se mueva con la velocidad que se quiera, siempre a velocidad uniforme y sin oscilaciones de dirección, y usted no será capaz de distinguir la menor alteración en todos los efectos citados ni podrá colegir por uno de ellos si el barco se mueve o está quieto”* (Galileo, 1632/2011: 152)

Esos diferentes puntos de vista de los que habla Galileo es lo que actualmente denominamos como ‘sistemas de referencia’ Cuando un sistema permanece en reposo o se desplaza con velocidad constante en relación a otro, son lo que conocemos como ‘sistemas inerciales’ Para la mecánica clásica, estos sistemas tienen que cumplir, de forma invariable, las leyes del movimiento de Newton. Por tanto, la variación del momento lineal<sup>4</sup> del sistema es igual a las fuerzas reales sobre el sistema, lo que se traduce como:

$$dp/dt - F_{real} = 0$$

Aunque también es posible describir en términos matemáticos un sistema no inercial:

$$dp/dt - F_{real} - F_{fict} = 0$$

---

<sup>4</sup> El momento lineal, ímpetu o, simplemente, momento, es una magnitud física vectorial (es decir, que se puede representar como línea recta dentro del espacio euclidiano) que describe el movimiento de un cuerpo en cualquier teoría mecánica.

La física actual entiende que los sistemas inerciales son sistemas libres de fuerza, es decir, cuando se aplica una fuerza, el comportamiento de ese cuerpo dejaría de considerarse como inercial.

Como sabemos, este experimento, al igual que otros propuestos por el astrónomo italiano, es de naturaleza mecánica. La idea es ayudarnos a visualizar que, cuando compartimos el movimiento con otro sistema y no tenemos ninguna referencia exterior para comparar, somos incapaces de reconocer si estamos quietos o nos desplazamos a una velocidad constante. De esta forma, solo existe una manera de percibir esta diferencia: mediante la aceleración. (Blanco Laserna, D. 2012: 50-51)

Imaginemos que estamos dentro del barco y que los ojos de buey están tapados, por lo que nos resulta imposible percibir nada del exterior a través de la vista. Cuando el barco comienza a desplazarse, se produce una aceleración que podemos percibir mediante nuestro sentido del equilibrio. Se trata, en definitiva, del mismo vértigo que nos producen los rápidos descensos de una montaña rusa. Poco a poco, el barco irá alcanzando la velocidad de crucero y, en algún momento, esa sensación fatigosa dejará de ser perceptible. Entonces, sin referencias del exterior, no hay manera alguna de distinguir el movimiento del sistema ya que nos encontramos insertados en el mismo.

Con este sencillo y magistral argumento, Galileo demolió la física aristotélica que había dominado durante siglos la investigación del cosmos. Esta, recordemos, recurría en gran parte a la metafísica para solventar los problemas que aparecían a la hora de la experimentación. Así, la relatividad del movimiento no solo explicaba el comportamiento de dos observadores diferentes con respecto al barco, sino que, aplicada a estructuras más grandes y complejas como el sistema solar, nos ayudaba a comprender de forma más adecuada el movimiento de nuestro propio planeta.

Cuando Galileo consideró que la aceleración era una variable importante a tener en cuenta, lo cambió todo. Esa es la pista sobre la que trabajará tiempo después Newton y que le permitirá desarrollar sus leyes del movimiento. Sus ecuaciones registran la aceleración del objeto, es decir, tienen en cuenta el cambio de velocidad que experimenta un cuerpo. El trabajo de Newton otorgó fuerza a las posiciones de Galileo y completó su argumentación. Para el inglés, además, la distancia que existía entre los cuerpos era otro factor a tener en cuenta, ya que esta afecta de forma directa a los cuerpos que se encuentran dentro del sistema de referencia.

La relatividad contemporánea y la cosmología física nacen aquí, de la mano de los experimentos mecánicos de Galileo y las leyes de Newton. El tiempo en mecánica clásica es tomado de manera invariable, absoluta. Es el mismo en todo el universo, con independencia del lugar donde se encuentre el observador o la distancia a la que se desplace. Para Galileo y Newton, no hay diferencia entre medir un intervalo de tiempo estando en reposo o en movimiento. El pivote sobre el que giran sus

planteamientos es que el tiempo no altera su curso natural bajo ninguna circunstancia. Es una manera de comprender la temporalidad muy ligada a la antropología tradicional que comentamos anteriormente. Un tiempo impuesto por Dios que avanza inexorable hacia un final inevitable. La relatividad que presentará Einstein alterará sustancialmente esta concepción. Dejaremos atrás ese tiempo absoluto del que habló Newton, para barajar otras hipótesis físicas en las que el tiempo pierde esa característica incondicional.

La luz, que en mecánica clásica no es tomada como un elemento decisivo en el orden del cosmos, también pasará a primer plano con la relatividad. Al igual que hiciese tiempo atrás Descartes, Newton también estudió la luz con especial interés, pero desde un plano óptico-geométrico y no asociado a sus características físicas. La luz se mueve a una velocidad absoluta, algo que veremos con detalle, y esta velocidad afecta al tiempo. Lo dilata, de hecho. Pero los físicos clásicos desconocían este aspecto, por lo que su teoría física, como hemos visto, es válida con objetos que se mueven a velocidades bajas en comparación a la de la luz. No solo el tiempo, sino que el espacio absoluto newtoniano cambiará drásticamente cuando entren en juego las geometrías no euclídeas con las que será más sencillo aplicar la relatividad. El espacio no será tampoco este contenedor estanco newtoniano, sino un tejido dinámico y moldeable bajo determinadas circunstancias.

#### **4. MAXWELL Y LORENTZ: EL ELECTROMAGNETISMO**

James Clerk Maxwell, el famoso matemático escocés, representa la segunda parada en nuestro intento por comprender cómo se articula la cosmología moderna. Formuló la teoría clásica de la radiación electromagnética en un acertado intento por unificar la electricidad, el magnetismo y la luz como manifestaciones de un mismo fenómeno. Las ecuaciones que Maxwell enunció en esta área son consideradas por muchos historiadores de la ciencia como la segunda gran unificación de la física, siendo la primera de ellas la que edificó Newton con sus leyes dinámicas y de la gravitación universal.

Esas ecuaciones que mencionamos, resultan ser un conjunto de cuatro fórmulas que describen de forma completa los fenómenos ocasionados por las fuerzas electromagnéticas. Los experimentos y trabajos teóricos previos de Orsted, Coulomb, Gauss, Ampère o Faraday fueron indispensables para el desarrollo de estas. Se introdujeron en la física los conceptos de campo y corriente, lo que articulaba la idea de campo electromagnético y, en consecuencia, permitía trabajar de forma unificada con diferentes magnitudes.

Hacia 1865, Maxwell alcanzó reconocimiento internacional gracias a su artículo *A dynamical theory of the electromagnetic field*, en el que defendía que la electricidad y el magnetismo se movían por el espacio en formas de onda a velocidades cercanas a la de la luz. Utilizaban para ello un tejido al que denominó *campo*. Con el tiempo, Maxwell pudo demostrar la existencia de estas ondas en campos electromagnéticos y fijar su velocidad concretamente en los 310 470 000 m/s.

*“Este acuerdo de resultados parece mostrarnos que la luz y el electromagnetismo son efectos de la misma sustancia, y que la luz es el resultado de una perturbación electromagnética propagada a través de un campo de acuerdo con las leyes electrodinámicas” (Maxwell, 1865/2011: 499)*

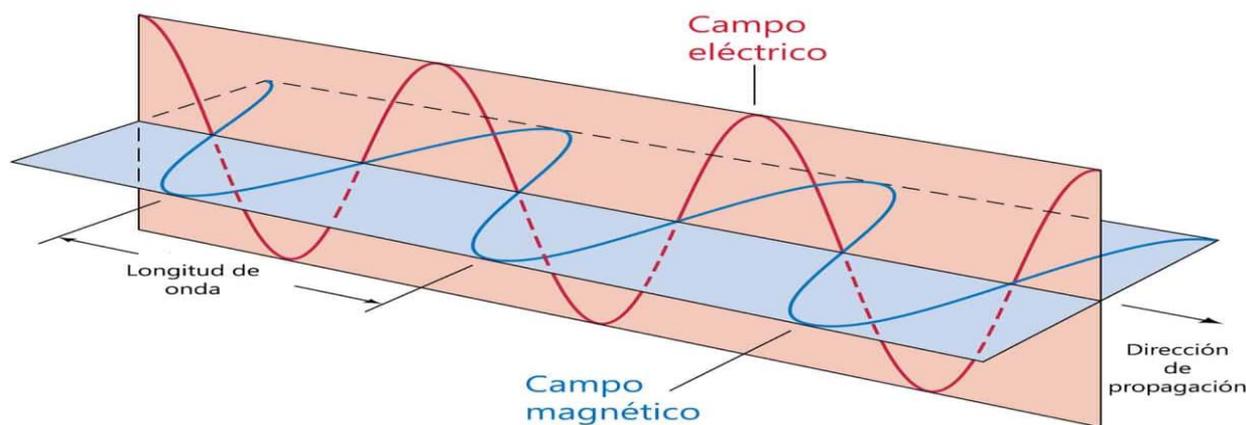


Figura 1: efecto por aceleración en un campo electromagnético

En un sistema de referencia inercial es posible expresar la fuerza como el resultado de multiplicar la masa por la aceleración. Las ecuaciones de Maxwell, sin embargo, sufrían graves alteraciones al ser impulsadas por la velocidad. En los sistemas que se encontraban en reposo, las fórmulas arrojaban resultados concisos y precisos; pero, al trasladarlas a sistemas en movimiento (como el barco galileano) estas se complicaban y devolvían toda clase de variables alocadas. Además, la comunidad científica creyó en un principio que había algún tipo de error en las formulaciones ya que los fenómenos que se estaban presenciando eran completamente desconocidos.

Si, por ejemplo, nos fijamos en un imán corriente, las líneas de campo a su alrededor tienen forma de lazo; sin embargo, al moverse a una velocidad más elevada, estas parecen cortarse en seco. Las ecuaciones de Maxwell, por tanto, ofrecían un método extraño con el que sí era posible diferenciar el desplazamiento uniforme desde dentro del sistema (Blanco Laserna, 2014: 57)

Para intentar encajar las piezas del puzle, en 1904 el científico neerlandés Hendrik Lorentz, propuso un nuevo grupo de ecuaciones con el que traducir las coordenadas entre sistemas separados por una velocidad constante. Estas fórmulas, bautizadas como transformaciones de Lorentz, maridaban

estupendamente con el trabajo de Maxwell y permitían conservar una estructura teórica sólida tanto en reposo como en movimiento. Cuando la velocidad era muy baja, podíamos trabajar con el sistema galileano-newtoniano; al aumentar esta a casi la de la luz, entraba en juego el tándem Maxwell-Lorentz. Dentro del entramado de la relatividad especial, las transformaciones de Lorentz dan cuenta de cómo se relacionan las medidas de una magnitud física obtenida por dos observadores diferentes. Las ecuaciones de Lorentz van a precisar un tipo de geometría diferente a la tradicional. Bajo el prisma de la relatividad especial, trabajamos con una geometría pseudo euclídea, es decir, con algunas variaciones respecto a la convencional; sin embargo, la relatividad general solo puede aplicarse en un entorno geométrico riemanniano. Es aquí donde podemos formular correctamente este sistema de ecuaciones.

Una de las principales consecuencias de las transformaciones de Lorentz es que el tiempo no es absoluto, sino que depende del marco de referencia del observador. Esto se debe a que las transformaciones de Lorentz implican una dilatación del tiempo, lo que significa que el tiempo parece pasar más lentamente en sistemas de referencia en movimiento relativo respecto a sistemas de referencia en reposo.

En cuanto a la manera en cómo se propagan las ondas a través del espacio, las transformaciones de Lorentz no hacen referencia al éter, sino que son una descripción matemática de la forma en que las mediciones del espacio-tiempo se relacionan entre diferentes sistemas de referencia en movimiento relativo. Las transformaciones de Lorentz se aplican tanto en sistemas de referencia en los que se considera que hay un éter en reposo como en sistemas en los que no se postula la existencia de un éter absoluto. Es importante aclarar que la teoría de la relatividad especial de Einstein fue desarrollada precisamente para explicar fenómenos físicos que parecían contradecir la existencia del éter. La teoría de la relatividad especial reemplazó la noción de ese extraño compuesto por el concepto de un espacio-tiempo que es relativo a la velocidad del observador, pero que no está anclado a ningún medio de propagación físico en particular.

Para Lorentz, el tiempo medido por un observador que se mueve a una velocidad constante en relación con otro observador es denominado como *tiempo local*, concepto fundamental para las posteriores formulaciones cosmológicas. Einstein sustituyó la idea de un tiempo absoluto, como el que tradicionalmente defendió Newton, por ese tiempo local o subjetivo, principio que articula la relatividad.

## 5. EINSTEIN Y MINKOWSKI: LA RELATIVIDAD

Tenemos, por tanto, varios precedentes antes de llegar a Einstein y sus formulaciones. Todo el asunto giraba en torno al movimiento, la aceleración y sus interacciones. Hasta la irrupción de las transformaciones de Lorentz, el tiempo y espacio estaban considerados como absolutos, pero esta tendencia estaba a punto de quebrarse por completo.

Particularmente relevante resulta en este momento histórico la crítica vertida por Ernst Mach a la idea de tiempo absoluto newtoniano. Mach se centró en la idea de que el tiempo absoluto no tiene un fundamento empírico, es decir, no se puede observar directamente en la naturaleza. Para este filósofo austríaco, el tiempo solo puede ser medido en relación a algún evento o proceso físico y, en consecuencia, no tiene sentido hablar de un tiempo que existe de forma independiente al universo. Ideas similares ya habían sido postuladas con anterioridad por otros pensadores como Leibniz (veremos esto más adelante). La crítica de Mach a ese tiempo absoluto se basó en su teoría del *análisis de sensaciones*, que sostenía que las percepciones humanas se basan en la experiencia sensorial y en la relación entre estas sensaciones. El tiempo no podía ser una propiedad objetiva, por decirlo de alguna manera, de la naturaleza, sino más bien una construcción subjetiva de la mente humana basada en la percepción de la duración de los eventos y en sus constantes interacciones. Para Mach, la idea de un tiempo absoluto se basaba en una concepción metafísica del mundo que carecía completamente de fundamento empírico (la misma crítica que Leibniz hizo a Newton). La física siempre debía basarse en la experiencia empírica, la observación y la verificación, y no en teorías abstractas que no aceptaban ningún tipo de experimentación.

*"No podemos hallar nada en el mundo externo que pueda corresponder a la idea de tiempo absoluto. Todas nuestras mediciones de tiempo se basan en comparaciones con procesos regulares recurrentes. [...] El tiempo es una propiedad subjetiva, una construcción de la mente, una herramienta que se utiliza para medir las relaciones entre los eventos. El tiempo absoluto, independiente del universo, es una ficción, una idea que no tiene fundamento empírico" (Mach, 1893/2001: 123).*

Con la relatividad de Einstein, el espacio y el tiempo adquieren una nueva y potente estructura. El esquema conceptual tradicional sobre estos elementos se rompe por completo, y deja paso a una interpretación totalmente original. Poco a poco, los viejos modelos explicativos basados en figuras geométricas visuales se sustituyen por complejos sistemas matematizados hasta el extremo, aunque físicamente precisos. Las predicciones, que, si bien fueron acertadas durante muchos siglos, alcanzan un nivel de efectividad nunca antes visto en el mundo. A partir de este momento, asistimos a una carrera vertiginosa en la que cada paso que damos nos acerca hasta barreras que antaño consideramos inalcanzables.

## 5.1. LA RELATIVIDAD ESPECIAL

Aunque Einstein no buscaba el desarrollo de la cosmología, acabó por ser considerado uno de los cosmólogos relativistas más influyentes de todos los tiempos. Su esfuerzo se centró, eso sí, en la idea de eliminar o, cuanto menos, pulir las discrepancias existentes entre la mecánica newtoniana (que nos acompañaba hacía ya varios siglos) y los recientes avances en la investigación electrodinámica de Maxwell. Einstein procuró siempre mantenerse fiel a dos postulados teóricos que, según él mismo afirmaría tiempo después, resultaban esenciales en el desarrollo de la relatividad:

- I) El principio de relatividad, presente desde Galileo, sostiene que las leyes físicas no se ven alteradas por el hecho de ser descritas en sistemas de referencia inerciales diferentes.
- II) La velocidad de la luz es absoluta, es decir, se mantiene siempre constante e invariable con independencia del estado del cuerpo que la emita (Sánchez Ron, 2014: 26)

Es importante aclarar que la consecuencia directa que podemos derivar de esto último es que la luz es una magnitud máxima, pero finita, y que, por tanto, ninguna suma de velocidades puede superarla. Aunque parezca extraño, la luz no actúa igual que, por ejemplo, un cuerpo con masa. Si nos desplazamos dentro de un tren a 150 km/hora y disparamos una pistola, la bala que salga del cañón se lanzará a su velocidad (160 km/hora, por ejemplo) más la velocidad de desplazamiento del tren. Pero, si en lugar de disparar una pistola, encendemos una linterna, la luz no sumará la velocidad del tren, sino que, de hecho, tendrá la misma velocidad de desplazamiento que si enciendo el artilugio con el tren en estado de reposo. La luz se mueve siempre a 300.000 km/segundo, con independencia de su fuente de emisión.

Pero el cambio profundo, y sobre el que se asentará el desarrollo posterior de la relatividad, es que Einstein, a diferencia de Newton, no sostiene la necesidad de un espacio absoluto en el que se cumplan estos presupuestos. Ese *éter* del que habían hablado otros autores quedaba descartado para Einstein (Sánchez Ron, 2014: 27) En un artículo publicado en 1905 bajo el nombre de *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*, quedaba clara su argumentación. El físico alemán tenía claro que los fenómenos producidos por el electromagnetismo, del mismo modo que los mecánicos, no poseían propiedad alguna que pudiese argumentar a favor de ese estado absoluto.

A diferencia de la física moderna, alejada de cualquier consideración metafísica, Newton y otros físicos clásicos sí que trabajaron bajo presunciones teológicas y también metafísicas. Consideraban que cierta

porción de la realidad estaba fuera de cualquier observación sensible. En el *Escolio* a la definición VIII de los *Principia*, Newton escribió lo siguiente:

“El tiempo, absoluto, verdadero y matemático, de suyo y por su propia naturaleza, sin relación a nada externo, fluye y se llama también duración. El relativo, por el contrario, aparente y vulgar, es una medida sensible y externa [es decir, que se puede percibir por los sentidos y que, además, no es algo natural del hombre] Es tomado por el vulgo como tiempo verdadero, del tipo: un año, una semana, un día. [...] El espacio absoluto, por naturaleza y sin relación a nada externo, permanece siempre igual a sí mismo e inmóvil. El relativo es la medida de este espacio, o cierta dimensión móvil, que es definida por nuestros sentidos según su relación a los cuerpos, y que el vulgo toma por espacio inmóvil. [...] En especie y magnitud son iguales el espacio absoluto y el relativo, no obstante, no siempre permanecen iguales en cuanto al número” (Newton, 1687/1982: 77)

Para Newton, en todo caso, podemos conocer de forma sensible el espacio y el tiempo relativos, pero nunca el absoluto. Cuando medimos, lo que hacemos es agrupar o coleccionar trozos de un todo mucho mayor y absoluto. Por ejemplo: podemos medir las horas y unirlos en días, y estos en años, pero no podemos alcanzar a comprender la eternidad del tiempo y su imprescindible necesidad como sustrato de toda la existencia universal. Del mismo modo ocurre con el espacio, nos resulta posible agrupar metros y desplegar kilómetros, o hablar de distancias entre objetos, pero, igualmente, estamos alejados de la totalidad espacial o absoluta. Este principio metafísico fue duramente criticado por los racionalistas y abandonado después de la irrupción de Lorentz y las formulaciones relativistas.

La teoría de Einstein presentó un universo en el que las interacciones entre objetos se producen, no conforme a un espacio absoluto, sino en relación al propio observador que las está percibiendo y describiendo. El espacio y el tiempo de Newton dejan de ser, en consecuencia, esas realidades absolutas e independientes de cualquier contenido, para pasar a entenderse bajo un prisma relativo al movimiento del observador.

Quizás, lo que más puede llamar nuestra atención en este momento es que el universo de Einstein evoluciona de las tres dimensiones cartesianas, a cuatro, incorporando el tiempo como una más. Es decir, tenemos un espacio de tres dimensiones (ancho, largo y profundo) más el tiempo. Esta última tiene un carácter imaginario (Sánchez Ron, 2014: 28), pero se vuelve imprescindible para hacer válidas las ecuaciones físicas de la relatividad.

*“Las visiones del espacio y el tiempo que deseo presentarles, han surgido del terreno de la física experimental y de ahí toman su fuerza. Son radicales. A partir de ahora, el espacio por sí mismo, así como el tiempo por sí mismo, están condenados a desvanecerse en meras sombras, y solamente una especie de unión de los dos conservará su independencia”* (Minkowski, 1909)

Hermann Minkowski (1864 – 1909) fue un brillante matemático de origen báltico. Los últimos años de su vida los dedicó al estudio de la relatividad especial de Einstein, e, inspirado en algunos trabajos de Poincaré y Lorentz, concluyó que esta podía explicarse mejor desde una geometría no euclidiana y en un espacio de cuatro dimensiones. El universo que imaginó Minkowski era bidimensional, austero, en el que los objetos se desplazan a velocidades constantes. En este, un cuerpo sin aceleración se puede representar mediante puntos e, incluso, líneas rectas. Cuando Minkowski introdujo la gravedad, constató que, bajo su influencia, las rectas se torcían, se doblaban, igual que si dibujamos una línea sobre un globo de cumpleaños. Las trayectorias rectas de la relatividad especial se convierten en geodésicas curvas al acelerarse en un universo con la geometría adecuada (Sánchez Ron, 2014)

## 5.2 LA RELATIVIDAD GENERAL

La relatividad especial no tenía en cuenta los campos gravitatorios o acelerados, es decir, la teoría especial es limitada o restrictiva en tanto establece la validez de todas las leyes de la física en marcos inerciales, incluyendo las del electromagnetismo (este es el avance con respecto a la mecánica clásica). Por su parte, la relatividad general amplió esa validez a cualquier tipo de campos, incluyendo los acelerados.

De forma sucinta, la relatividad general es una teoría geométrica de la gravitación, con base en la geometría diferencial. En particular, utiliza la geometría riemanniana. La geometría riemanniana es una rama de la geometría diferencial que se ocupa del estudio de las propiedades geométricas de las variedades riemannianas. Estas variedades son espacios suaves que están equipados con una estructura métrica, lo que significa que tienen una noción de distancia entre puntos. Esta geometría tiene su fundamento en el trabajo del matemático alemán Bernhard Riemann, quien estableció los fundamentos de esta teoría en el siglo XIX. Riemann introdujo el concepto de una métrica riemanniana, que es una función que asigna un producto interno a cada punto de una variedad diferenciable, de modo que, para cada par de vectores tangentes en ese punto, la métrica determina su longitud y el ángulo entre ellos. La curvatura riemanniana es una cantidad que mide cómo se curva o distorsiona una variedad en cada punto. Existen diferentes medidas de curvatura, como la curvatura seccional y la curvatura de Ricci, que describen cómo se curvan los planos y las curvas en la variedad. Además, la curvatura de Ricci permite definir la curvatura escalar, que proporciona una medida global de la curvatura de la variedad en su conjunto. Todo esto resulta especialmente importante para la relatividad.

La idea fundamental de la relatividad general es que la presencia de materia y energía curva el espacio-tiempo en su entorno, y esta curvatura a su vez influye en cómo se mueven los objetos a su alrededor.

Esta curvatura se expresa matemáticamente mediante una ecuación conocida como ecuación de campo de Einstein, que relaciona la curvatura del espacio-tiempo con la distribución de materia y energía en el universo. En realidad, la materia sigue una trayectoria geodésica al moverse, solo que ya no se mueve en un plano euclídeo, sino en el espacio tetradimensional riemanniano. Sería curva, en todo caso, con respecto a la geometría de Euclides. Lo que tenemos aquí es un espacio-tiempo deformable en función de la masa (o energía), por eso la gravedad es una manifestación de la geometría, porque los cuerpos graves deforman el tejido espacio temporal (De Paz, 2023)

“La gravedad no es una fuerza ajena y física que actúa en el espacio, sino una manifestación de la geometría del espacio justo allí donde se encuentra la masa. [...] El espacio le dice a la materia cómo debe moverse, y la materia le dice al espacio cómo debe curvarse” (Wheeler, 1986)

De manera similar al capítulo anterior, podemos sintetizar los dos principios básicos en los que se sostiene la relatividad general:

- I) La trayectoria de un cuerpo, cerca de en un campo gravitatorio fuerte, adopta la forma de una curva.
- II) Por tanto, la relación entre la presencia de masa y la aceleración se explican de forma más acertada si nos insertamos en un espacio de cuatro dimensiones.

La relatividad general de Einstein nos dice que, en una porción limitada del espacio, se producirá una curvatura en función de la cantidad de masa y energía allí presentes. Imaginar esta interacción como un folio extendido que se pliega cuando dejamos caer sobre él una pesada canica, es un error habitual (figura 2). Tengamos en cuenta que el espacio rodea por completo al objeto y que, por tanto, la influencia se produce en todas direcciones. Así, la curvatura podría entenderse como una contracción (figura 3).

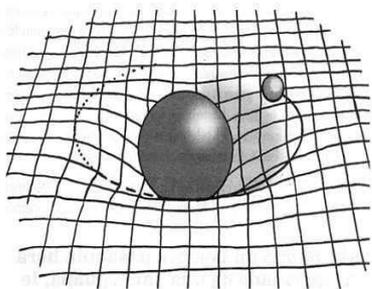


Figura 2: representación clásica de curvatura

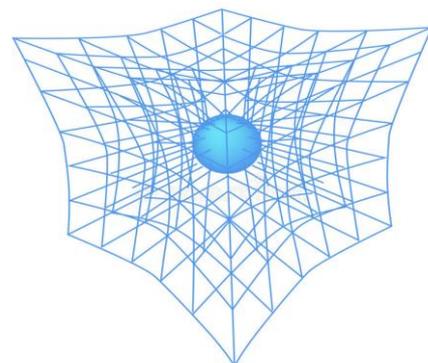
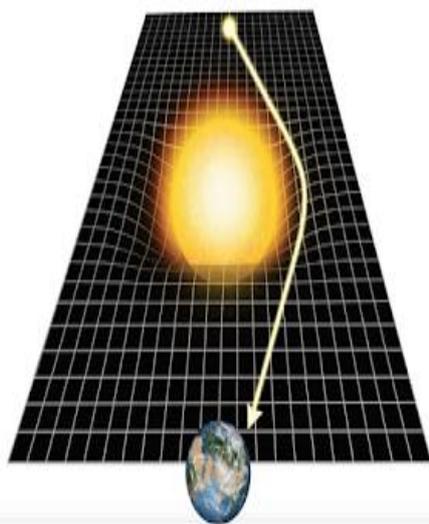


Figura 3: representación contemporánea de curvatura

No es necesario señalar que el asunto es mucho más complejo de lo que aquí estamos exponiendo. No obstante, estas breves y sencillas líneas son suficientes para comprender, de forma general, las principales piezas que articulan el entramado relativista.

Pero, como vemos, hay una fuerte dosis de imaginación en todo este asunto. Ni Einstein, ni sus colegas, estaban dispuestos a dejar que esta hipótesis, que abría un nuevo universo ante nuestros ojos, fuese abandonada por falta de experimentación. Era necesario comprobar que la relatividad resultaba una teoría explicativa y que podía aplicarse fielmente a los fenómenos que observamos en el universo.

### 5.3 EL ECLIPSE QUE DIÓ LA RAZÓN A EINSTEIN



salvo que no se cruzase con ningún cuerpo. A la izquierda, en la *figura 4*, podemos observar una representación artística del efecto esperado.

Para el caso del Sol, como podemos apreciar en la imagen, Soldner estimó en 0,84 segundos de arco el ángulo de la desviación. Y, aunque parecía algo interesante y que merecía la pena explorar, el propio Soldner abandonó su teoría ya que, con los medios de la época, era imposible de comprobar. En su lugar, la teoría de la luz ondulatoria presentada por Christian Huygens fue tomando fuerza (Blanco Laserna, 2014: 127)

En el verano de 1911, Einstein resucitó la idea de Soldner. En su caso, el físico alemán partía de unos presupuestos teóricos distintos a los que sostuvo en su momento Soldner, pero la idea que se pretendía demostrar era similar. Los cálculos de Einstein, publicados en un artículo que llevaba por nombre *Sobre la influencia de la gravitación en la propagación de la luz*, arrojaron un total de 0,83 segundos de arco. Como vemos, la diferencia entre ambos resultados era mínima. Einstein escribió poco después:

“Puesto que durante los eclipses de Sol las estrellas fijas se hacen visibles en las regiones del cielo más próximas al Sol, esta consecuencia de la teoría se puede contrastar mediante una prueba experimental. Sería deseable que los astrónomos prestasen atención a la cuestión que aquí se plantea, a pesar de que pueda parecer que las reflexiones que hemos realizado carecen de fundamento o son, quizás, extravagantes” (Einstein, 1913)

Tras aquella afirmación, la comunidad científica occidental se puso manos a la obra con el fin de encontrar el eclipse de Sol que tendría lugar con más proximidad y con el que se pudiesen poner a prueba las afirmaciones de Einstein. No tardaron mucho en encontrar un evento de estas características. Para agosto del año siguiente, en 1914, estaba previsto un eclipse total que cumplía con todos aquellos

requisitos que la comprobación de la teoría demandaba. Lamentablemente, la Primera Guerra Mundial, y el inicio de las hostilidades entre Alemania y Rusia, dieron al traste con aquél deseado experimento. El lugar idóneo se encontraba al sur de la actual Ucrania, cerca de la península de Crimea, una región fuertemente militarizada desde entonces. En consecuencia, no se permitió a los astrónomos alemanes preparar allí su campamento de observación bajo infundadas acusaciones de espionaje.

Meses después, en noviembre de 1915, Einstein corrigió sus cálculos. El resultado varió sensiblemente del anterior, situándose esa vez en 1,7 segundos de arco. Siendo así, los lugares desde los que podían comprobarse la teoría relativista se ampliaban en número y ya no estaban tan restringidos. Con ilusiones renovadas, la Universidad de Cambridge y la Real Sociedad Astronómica de Reino Unido (liderado por Arthur Eddington) organizaron una nueva expedición en mayo de 1919. En esta ocasión, se dividirían en dos grupos: uno de ellos se desplazaría hacia el sur de la línea del ecuador, a la ciudad de Sobral en Brasil; mientras que el otro circularía hacia el norte de esta línea, concretamente a la isla del Príncipe, en Guinea.

Eddington, que estaba en el grupo norte, realizó rápidas placas de fotografías durante los escasos minutos en que duró el eclipse. El astrónomo inglés desarrolló una gran maestría en este arte fotográfico, habilidad que compartirá con Hubble tiempo después y que sirvió para que este último completase un amplio estudio acerca del desplazamiento de las galaxias. Días después, las placas de ambos grupos fueron reveladas. Para completar la segunda parte del experimento, Eddington seleccionó cuidadosamente un grupo de fotografías tomadas durante una noche de invierno, en Inglaterra, solo unas semanas atrás. Tras numerosas correcciones de resultados achacadas a errores en las mediciones instrumentales, Eddington publicó que, efectivamente, la luz presentaba una desviación de 1,7 segundos por arco.

Finalmente, tras varias reuniones y discusiones, el 6 de noviembre de 1919 en una conferencia conjunta de la Sociedad Real de Astronomía Británica y la Royal Society, se afirmó que la expedición liderada por Eddington corroboraba la teoría de la relatividad general de Einstein.

La idea que inmediatamente se desprende de todo este asunto, y que modificará los modelos cosmológicos en los años venideros, es que el enorme peso de planetas y estrellas deforma el tejido espaciotemporal creando una curvatura que influye, decisivamente, en los cuerpos celestes. (Rioja y Ordóñez, 2006). Se inauguraba en ese instante la era post newtoniana. El universo relativista actualizaba los parámetros bajo los que operaba la gravedad clásica de Newton, aunque no en todos los sistemas. Cuando el peso de un objeto es pequeño y este no se mueve a velocidades demasiado elevadas, la física de Newton parece operar de forma más adecuada y fructífera. No obstante, a escalas

cósmicas y bajo un esquema de objetos masivos y altas velocidades, la relatividad presenta un modelo mucho más explicativo y predictivo. Apareció entonces la necesidad de construir nuevos modelos cosmológicos, adecuados a estos descubrimientos y que pudiesen diseñar el futuro del cosmos.

## 6. HUBBLE Y LEMAÎTRE: EL BIG BANG

Durante la década de los 20, y empujados por esa necesidad, varios físicos, astrónomos y matemáticos comenzaron a trabajar en una cosmología dinámica con base en las ecuaciones de campo de la relatividad general de Einstein. El universo estático, en el que habíamos enmarcado todas nuestras nociones e investigaciones, resultaba insuficiente para la nueva física.

Como muestra del interés que suscitó el famoso experimento del eclipse, así como las formulaciones de Einstein, entre los miembros de la comunidad científica internacional, tenemos el famoso *Gran Debate* de 1920 en Washington. La discusión giró en torno a la naturaleza de las nebulosas, es decir, esos enormes grupos de estrellas y polvos que podíamos apreciar a miles de millones de kilómetros gracias a los modernos telescopios. No quedaba claro si esas gigantescas estructuras quedaban dentro de los límites de nuestra propia galaxia o, si, por el contrario, conformaban en sí mismas núcleos estelares diferentes y separados. En relación a la primera idea tenemos a Harlow Shapley<sup>5</sup> y, como defensor de la segunda, a Heber Curtis<sup>6</sup>.

El problema nació en las observaciones de Vesto Melvin Slipher, un astrónomo de origen estadounidense que trabajó desde el observatorio de Lowell, Arizona. Sus estudios confirmaron que las líneas espectrales de algunas nebulosas lejanas se desplazaban hacia el rojo. Esto, traducido a resultados matemáticos tras aplicar el efecto Doppler, significaba que esos objetos observados estaban alejándose de nosotros. De hecho, otras nebulosas mostraron líneas azules, lo que significaba justo lo contrario: que se encontraban cada vez más cerca del observador.

Otra astrónoma norteamericana, Henrietta Swan Leavitt, esta vez desde el Harvard College, estudió un grupo de estrellas de brillo variable denominadas Cefeidas. Descubrió y catalogó varias de estas estrellas en la Nube de Magallanes, lo que le permitió establecer una curiosa relación. Comparando el momento de luminosidad máxima (es decir, el instante en que la estrella era más visible) con el de más baja emisión de luz, Leavitt podía fijar una distancia muy certera entre la Cefeida y nuestro planeta.

---

<sup>5</sup> Harlow Shapley (1855 – 1972) fue un conocido astrónomo estadounidense. Trabajó en el Observatorio del Monte Wilson, el mismo en el que Hubble llevó a cabo sus investigaciones.

<sup>6</sup> Heber D. Curtin, astrónomo estadounidense, 1872 - 1942

Gracias a esta técnica de medición, varios astrónomos comenzaron a medir distancias entre la Tierra y varias nebulosas. (Mason, 2012; Rioja y Ordóñez, 2006)

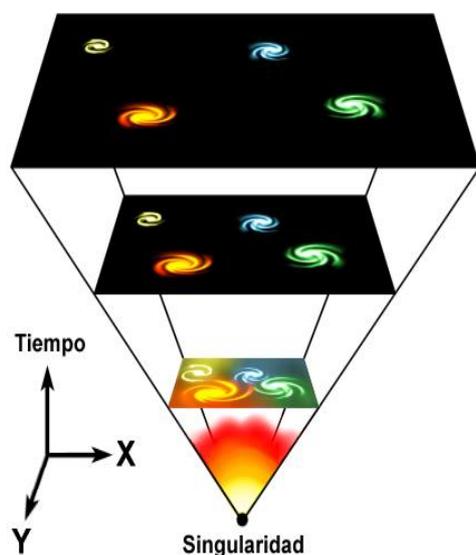
De entre todos ellos, quizás el más reconocido sea Edwin Hubble, también estadounidense. Hubble centró su atención, acuciado por el debate que se estaba produciendo durante esos años, en medir las distancias desde nuestro planeta hasta otras nebulosas. Para ello, se sirvió del trabajo de Slipher y Leavitt. Tras varios años, Hubble y su equipo lograron fijar la distancia entre la Tierra y Andrómeda en, como mínimo, 900.000 años luz, o lo que es lo mismo, diez veces más lejos que el objeto más distante ubicado hasta ese momento. Hoy en día, gracias en parte a los estudios de Walter Baade, sabemos que la distancia real de la galaxia a la galaxia de Andrómeda es de más de dos millones de años luz (Weinberg, 2021). Se aceptó que un objeto tan alejado no formaba parte de la Vía Láctea. Resultaba evidente que se trataba de una galaxia independiente ya que no había conexión astronómica alguna entre la materia allí presente y nuestro propio sistema. Esto cerró el *Gran Debate* al aportar sólidas evidencias que inclinaron la balanza en favor de la postura de Curtis y la idea de que las nebulosas son objetos extra galácticos.

En términos cosmológicos, esto significaba aceptar que los límites de nuestro universo eran mucho más amplios de lo que nunca habíamos imaginado.

En 1929, Hubble logró definir una ley que relacionaba, de forma directa y sencilla, la distancia a la que se encuentra una galaxia de otra y la velocidad a la que se mueve. Así, pudo calcular la distancia de casi una veintena de galaxias a partir de la luminosidad aparente de sus estrellas más brillantes. Luego, comparó esas distancias con las velocidades de otras galaxias gracias al análisis espectroscópico y el efecto Doppler. Para minimizar los errores en sus cálculos, Hubble limitó su estudio a galaxias que no superasen los 20 000 km/s. Sus resultados le permitieron afirmar que las velocidades de las galaxias aumentaban en 170 km/s por cada millón de años luz de distancia. Dicho de otra forma, una velocidad de 20 000 km/s de desplazamiento para una galaxia típica implica una distancia de 120 millones de años luz. Estos datos serían posteriormente revisados y modificados por Walter Baade, entre otros, ajustando a la baja la constante y situándola en 15 km/s por millón de años luz (Rosado Carmona, 2022) Tiempo después, en 1936, Hubble inició un programa de investigación en colaboración con Milton Humason, cuyo objetivo central fue el de medir con exactitud la distancia y velocidad de movimiento de Ursa Majoris II, una estrella situada en la constelación de la Osa Mayor. Estimaron que se alejaba de nosotros a 42 000 km/s, es decir, un 14% de la velocidad de la luz. Además, confirmaron que se encontraba a 260 millones de años luz de la Tierra.

En la práctica, los trabajos de Hubble son la constatación de que nuestro universo es dinámico y se encuentra en constante expansión. La ley de Hubble articula y dinamiza la cosmología moderna, dotando a su estructura conceptual de herramientas matemáticas capaces de demostrar su veracidad más allá de conjeturas o suposiciones. Hubble sentó las bases de un modelo cosmológico inflacionario que tuvo, en Lemaître, otro gran artífice (Rosado Carmona, 2022)

## 6.1 EL ÁTOMO PRIMIGENIO



El astrónomo y físico belga Georges Lemaître, estudió con detalle los avances astronómicos que llegaban desde EEUU, así como los experimentos de los ingleses y las formulaciones de Einstein. En 1927, un poco antes de que Hubble publicase su famosa Ley, Lemaître redactó varios artículos en los que exploraba la posibilidad cosmológica del origen del universo en la forma de un átomo o huevo primitivo. Se trataba, según explicaba, de un punto singular (figura 5), perteneciente a un pasado remoto. Este carecía, además, de toda cualidad física y operaba bajo unas leyes naturales que no podríamos reconocer pues aún no estaban completamente articuladas.

Figura 5: representación gráfica Big Bang

En 1931, con el apoyo de la Real Sociedad Astronómica de Londres, se decidió a publicar una visión más estructurada de su teoría en la revista *Nature*. En ese artículo, con profundos tintes filosóficos, explicó con detalle que esa primera explosión tuvo lugar bajo unas condiciones muy particulares: la masa de aquel átomo era infinitamente condensada y se encontraba sometida a una gravedad infinitamente grande. “Podemos concebir el comienzo del universo en la forma de un único átomo” (Lemaître, 1931) escribía en aquel artículo. Al contrario de lo que podemos pensar intuitivamente (es decir, que el átomo es un objeto de dimensiones extremadamente pequeñas), el átomo original de Lemaître tenía un tamaño colosal. Durante un proceso de desintegración nuclear, tal como el que afecta al uranio o al plutonio, se provocó no solo la expansión del tejido espaciotemporal, sino la creación de toda la materia. Helge Kragh, actualmente profesor emérito de la Universidad de Copenhague afirma que, si bien Lemaître nunca se decantó (al menos públicamente) por exponer una hipótesis acerca de cómo apareció este huevo primigenio, dado su carácter católico, es bastante probable que esta idea

apareciese bajo un dominio teológico. Sería Dios quien, en última instancia, creó este punto singular y, por voluntad propia, lo liberó cuando lo consideró oportuno (Mediavilla, 2013)

Estos compases teóricos suponen el primer desarrollo formal de la cosmología moderna. No obstante, la idea de que todo el universo se originase en un momento determinado del tiempo no fue bien recibida por la comunidad. Uno de los acérrimos detractores de esta hipótesis fue el astrónomo inglés Fred Hoyle. A principios de 1949, Hoyle participó en un conocido programa sobre divulgación de la cadena BBC. El astrónomo estuvo argumentando largo rato en contra de la teoría propuesta por Lemaître. Para él, la idea de un universo que tuviese un principio completamente definido suponía una aberración. Defendió la teoría del estado estacionario en la que se concibe un universo eterno, sin cambios sustanciales, y en el que la materia se crea de una forma lenta y progresiva. Durante aquella exposición, y a modo de burla, se refirió a la idea de una gran explosión como una especie de ‘big bang’ en alusión al sonido que este fenómeno podía producir.

La idea que articuló el Big Bang era sencilla: si, de acuerdo a las observaciones y cálculos de Hubble, tenemos que las galaxias se alejan unas de otras a velocidades constantes, eso implica que, para alejarse, dos objetos han debido estar con anterioridad lo más cercanos posible en el espacio. Si, además, tenemos que existen otros cúmulos de estrellas independientes del nuestro, eso significa que el universo tiene que tener una edad muy antigua para que haya tenido tiempo de crear estos enormes sistemas. Tenemos, por tanto, un universo homogéneo (la misma materia) e isótropo (las mismas leyes y propiedades en todas direcciones) que se expande de forma indefinida o, en todo caso, cuya expansión se frena con el tiempo. Es necesario indicar también que la relatividad general de Einstein no admite soluciones estáticas como la de Hoyle, ya que, para encontrar resultados adecuados en las ecuaciones de campo, el universo debe estar en movimiento.

Sobre finales de los años 50, Stephen Hawking, George Ellis y Roger Penrose, prestaron atención a la teoría de la relatividad y sus implicaciones con respecto a nuestra manera de concebir el tiempo. Entre 1968 y 1979, publicaron varios artículos en los que extendieron la teoría de la relatividad general con el fin de incluir mediciones detalladas del tejido espaciotemporal. Sus cálculos indicaban que el espacio-tiempo tuvo un inicio finito, es decir, delimitado. Este se correspondía con el origen de la materia y la energía que actualmente cohabitan en nuestro universo. El problema aparecía bajo la singularidad inicial, pues en ese momento, conocido como tiempo de Planck, los resultados de las

ecuaciones se muestran totalmente alterados. Existen hoy día muchas líneas de investigación abiertas para resolver este problema como la famosa *teoría de cuerdas*<sup>7</sup>.

Lo que sí está aceptado ampliamente por la comunidad científica, son una serie de ecuaciones que explican de forma exacta y completa cómo se produjo la inflación, dotando a esta teoría de una base fisicomatemática que otorga solidez a todo el conjunto. Veamos.

## 7. LA FORMALIZACIÓN MATEMÁTICA DE LA INFLACIÓN

Tenemos, ahora sí, todos los ingredientes necesarios para articular y estructurar a la cosmología moderna. De manera sucinta podríamos recordar los siguientes:

- I) Expansión del universo: la observación de que el universo está en constante expansión es una de las ideas centrales de la cosmología contemporánea. Esta expansión fue descubierta, como ya hemos visto, por Edwin Hubble en la década de 1920, y se ha confirmado y refinado desde entonces mediante observaciones de la radiación cósmica de fondo y otros métodos. La expansión sugiere que el universo tuvo origen en la singularidad, un punto extremadamente denso y caliente, lo que lleva a la siguiente idea.
- II) El Big Bang: la teoría del Big Bang es la explicación científica más aceptada del origen del universo. Según esta teoría, el universo se originó a partir de una inflación cósmica hace aproximadamente 13.800 millones de años. Desde entonces, el universo ha estado en constante expansión lo que implica, de manera recíproca, una de las más altas evidencias de la teoría.
- III) La teoría de la relatividad general de Albert Einstein: esta describe la relación entre la materia y la geometría del espacio-tiempo. Es una de las teorías fundamentales que se utilizan para entender la estructura y evolución del universo a gran escala. Esto es fundamental para la cosmología moderna, ya que se utiliza para modelar y entender las propiedades del universo en su conjunto, como la expansión que hemos comentado, la formación de estructuras a gran escala tipo agujeros negros o la dilatación temporal.

Solo nos falta un aspecto: el matemático. Necesitamos diseñar un modelo explicativo y predictivo que agrupe todas las características que las observaciones y experimentaciones del siglo XX han puesto

---

<sup>7</sup> Las teorías de cuerdas son una serie de modelos fundamentales de física teórica que asumen que las partículas subatómicas, aparentemente puntuales, son en realidad «estados vibracionales» de un objeto extendido más básico llamado «cuerda» o «filamento»

sobre la mesa. Un modelo que nos permita entender de la mejor manera posible las razones por las que nuestro universo es como es.

Para describir el universo en expansión, así como su homogeneidad e isotropía, disponemos de la métrica de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) Esta ecuación asume que la métrica del universo<sup>8</sup> puede ser dependiente directamente del tiempo. En unidades en las que  $c = 1$ , la métrica general cumple estas condiciones:

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 [dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\phi^2]$$

Donde:

$k$  es la curvatura en espacio y la constante en el tiempo.

$a(t)$  el factor de escalada, que depende directamente del tiempo, toma en consideración la velocidad de la luz.

Este factor de escala permite normalizar a condiciones reconocibles la ecuación. Para ello, consideramos el factor de escala actual como la unidad, es decir,  $a(t) \equiv 1$  La coordenada marcada como  $r$  es dimensional al igual que  $k$ . Pero si tomamos una aproximación de  $k$  en  $\pm 1$  o incluso 0, habría que considerar que  $k = H_0^2 \Omega_0 - 1$ . Otra posibilidad, que ya no vamos a explorar, sería considerar a  $k$  igual a  $\pm 1$  o 0, por lo que habría un escenario matemático diferente.

Lo importante, es señalar que la métrica de FLRW se utiliza como el primer paso para realizar cálculos predictivos dentro de nuestro universo. FLRW asume la homogeneidad, parte de este presupuesto, por lo que muchos autores consideran que este modelo está obviando variaciones importantes como la de la temperatura del universo en diferentes escalas. No obstante, sí que es posible incorporar al modelo variables de temperatura que arrojan resultados muy exactos. De hecho, desde el año 2003, diferentes universidades norteamericanas y europeas han trabajado en las implicaciones teóricas en este sentido y obtenida evidencia observacional para sus resultados.

Las ecuaciones de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW), como decimos, describen la dinámica de un universo homogéneo e isotrópico en expansión, y son, por tanto, fundamentales para la cosmología moderna. Estas ecuaciones se derivan a partir de la teoría de la relatividad general de Einstein. La diferencia con respecto a la mecánica clásica es que esta última describe el movimiento

---

<sup>8</sup> La métrica del universo es una pieza clave en la física moderna. De forma resumida, podemos explicar que esta variable considera los cambios que se producen en el tejido espaciotemporal conforme el universo se hace más viejo. Esta métrica viene corroborada por experimentos, mediciones y cálculos realizados a lo largo de las últimas décadas del siglo XX e inicios del XXI.

de objetos macroscópicos bajo la acción de fuerzas, como la ley de gravitación de Newton. Esta teoría no tiene en cuenta la curvatura del espacio-tiempo, que es fundamental para la cosmología y está descrita por las teorías relativistas. Por lo tanto, las ecuaciones de FLRW no pueden usarse bajo parámetros de la mecánica clásica, ya que la cosmología moderna se basa en la teoría de la relatividad general, y no en la mecánica clásica. Sin embargo, en algunas situaciones, como en la descripción de la dinámica de sistemas astronómicos ‘pequeños’ como galaxias, puede ser suficiente utilizar la mecánica clásica para hacer predicciones precisas.

Los actuales modelos cosmológicos, fuertemente matematizados, responden a las más variadas cuestiones acerca del funcionamiento del cosmos. Predicen el comportamiento de la materia y la energía a gran escala, y son capaces de explicar cómo se expande el cosmos desde su primer instante. No obstante, como ya indicamos antes, estos modelos quedan inservibles bajo las condiciones de la singularidad inicial.

## 8. EL PROCESO INFLACIONARIO

Como hemos señalado, los seres humanos entendemos nuestra propia existencia en relación a un inicio y un final, momentos bien señalados y delimitados en el tiempo. Pero, para comprender el universo, no podemos comenzar desde el instante cero<sup>9</sup>. La física no puede desarrollar formulaciones adecuadas ya que desconoce cómo interactuaban las variables matemáticas bajo el dominio de la singularidad. No obstante, sí que puede trabajar si regulamos un poco el punto de partida. Por tanto, nos vemos forzados a avanzar ligeramente hacia delante para poder empezar a comprender.

“Por desgracia, no puedo empezar la película en el tiempo cero y con temperatura infinita. Por encima de un umbral de temperatura de un billón y medio de kelvin ( $1,5 \times 10^{12}$  K), el universo contendría grandes cantidades de las partículas llamadas mesones pi, que pesan aproximadamente una séptima parte de una partícula nuclear promedio. A diferencia de los electrones, los positrones, los muones y los neutrinos, los mesones pi interactúan muy fuertemente unos con otros y con las partículas nucleares [...] La presencia de una gran cantidad de tales partículas de interacción fuerte hace extraordinariamente difícil calcular la conducta de la materia a temperaturas super elevadas, de modo que, a fin de evitar tan difíciles problemas matemáticos, iniciaré la historia [...] a una centésima de segundo, aproximadamente, después del comienzo cuando la temperatura se había enfriado ya hasta unos 100 000 millones de kelvin, muy por debajo de los umbrales de temperatura de los mesones pi, los muones y todas las partículas pesadas” (Weinberg, 2021: 146)

Ese ‘avanzar ligeramente’ al que hemos hecho referencia, puede caracterizarse como un *tiempo de Planck*. Un tiempo de Planck ( $t_p$ ) o *cronón*, es el intervalo de tiempo más pequeño que podemos definir

---

<sup>9</sup> De hecho, el instante cero sería la propia singularidad.

en física y corresponde a  $5.39124 \times 10^{-44}$  segundos. Tiene su equivalente espacial en la *longitud de Planck*. La mecánica cuántica no puede establecer medidas de tiempo y espacio más pequeñas que estas sin perder coherencia y efectividad en los cálculos. La cronología primitiva de la inflación toma como referencia esta medida temporal. En consecuencia, y para que los cálculos puedan ser comprensibles, no explicamos la evolución de la inflación desde el momento cero, sino desde el primer instante de Planck.

Antes de avanzar y entrar en los detalles de la inflación inicial de nuestro universo, merece la pena detenerse un momento para reflexionar acerca de la dificultad que nuestra mente tiene para representar fielmente ciertos conceptos físicos o modelos matemáticos. Veamos, sin ir más lejos, el caso del tiempo de Planck. Si nos fijamos nuevamente en la cifra, esta resulta ridículamente pequeña para nosotros que estamos acostumbrados a lidiar con el tiempo de una forma mucho más amplia. Cotidianamente hablamos de horas, meses, años e, incluso, décadas. Es cierto que tenemos relación también con medidas más pequeñas que un segundo, por ejemplo, en las competiciones deportivas cuando un atleta consigue una medalla de oro por unas décimas o centésimas; o también cuando leemos acerca de algún experimento científico en el que se explica que ocurre una reacción química en milésimas de segundo. Pero son casos aislados, lo habitual es que tengamos una visión de nuestro tiempo mucho mayor.

Intentar representar en nuestra imaginación el tiempo de Planck, es tarea imposible. No tenemos ninguna referencia sensible para tiempos tan pequeños. Ocurre lo mismo cuando nos referimos a la singularidad originaria y pensamos que ‘fuera’ de ese punto no había ‘nada’ Esto no lo hacemos por simple capricho semántico, sino que adolecemos de términos más específicos para referirnos a esas verdades o nociones tan poco intuitivas. Desde que nacemos tenemos contacto con el espacio y el tiempo, estos forman parte indisoluble de nuestra constitución. Lo reconocemos e identificamos, aunque, bajo determinadas circunstancias como una enfermedad o alguna droga, podamos percibirlos puntualmente de manera distorsionada. Convivimos con el tiempo igual que lo hacemos con nuestros recuerdos o sentimientos. En ningún momento de nuestra vida, podremos desprendernos de estas intuiciones.

Sin embargo, no tenemos experiencia alguna con un vacío absoluto en el que no se encuentre constituido un tejido espaciotemporal y las leyes físicas. Al no tener ninguna referencia, ni siquiera de forma remota, nos resulta imposible imaginar realmente a qué nos estamos refiriendo cuando hablamos de la singularidad, por ejemplo. El tiempo de Planck, en tanto supone una mil millonésima parte de un segundo, se escapa igualmente a nuestra capacidad de representación. Podemos utilizar el concepto de forma filosófica, matemática o cosmológica con el fin de explicar un proceso de características físicas,

pero, en realidad, lo único que estamos manejando es el término lingüístico sin ninguna imagen mental que le preste soporte y auxilio, es decir, está vacío o hueco. Si pensamos en un árbol, el concepto está asociado instantáneamente a la representación mental de este objeto; lo mismo ocurre si pienso en una pelota o en una estrella. Pero en conceptos físicos como la singularidad, el tiempo de Planck, el vacío o la nada, esto no ocurre en nuestra imaginación. Simplemente hablamos y exponemos una realidad física que conocemos gracias a las formulaciones y ecuaciones matemáticas que luego son tratadas por el lenguaje para que sean comprensibles. Más allá de esto, no tenemos ninguna opción real de experimentar o imaginar estas realidades. Esta falta de imagen mental, esta imposibilidad de percibir intuitivamente qué sea el tiempo de Planck es una dificultad fundamental a la hora de comprender el tiempo desde la cosmología contemporánea.

## 8.1 LA CRONOLOGÍA DEL BIG BANG

Las observaciones del fondo de microondas sugieren que nuestro universo tiene una edad de entre 13 400 y 13 800 millones de años. Sin embargo, la mayor parte del proceso de expansión y constitución de fuerzas se gestó en apenas tres minutos. A partir de ese momento, comprender el proceso resulta mucho más sencillo.

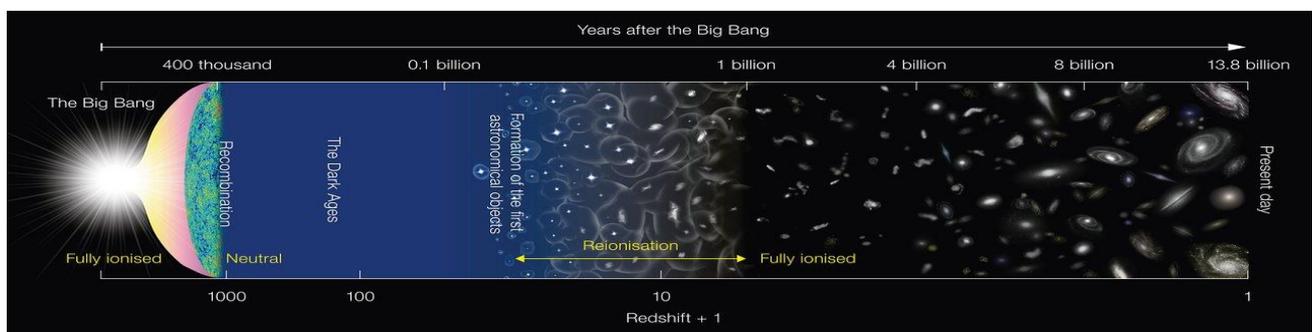


Figura 6: cronología del Big Bang

Entre el momento cero y el primer instante medible en el  $10^{-43}$ , las cuatro grandes fuerzas comienzan a desplegarse de forma autónoma. La cosmología física teoriza que, durante la singularidad, estas fuerzas se encontraban unificadas bajo un mismo paradigma y, en consecuencia, conceptos como masa, carga o velocidad carecen de significado. Cuando el proceso de autonomía se completó, en torno al  $10^{-36}$  segundos, ya tenemos tres fuerzas primitivamente diferenciadas: la gravitación, la nuclear fuerte y una mezcla de electromagnetismo y fuerza nuclear débil<sup>10</sup>. Los cálculos matemáticos

<sup>10</sup> Esta simbiosis de fuerza es estudiada por el denominado como *modelo electrodébil*.

coinciden en que el electromagnetismo se constituirá como fuerza independiente durante los cronones<sup>11</sup> posteriores.

Entre el  $10^{-36}$  y el  $10^{-33}$  segundos comienza la inflación. Un proceso extremadamente rápido, pero que permitió al universo duplicar su tamaño en una fracción de tiempo casi imperceptible. Durante la inflación, comenzó a solidificarse la estructura del espacio tiempo, sin embargo, ese universo nos resultaría completamente irreconocible. No solo las fuerzas y leyes actuaban todavía de manera extraña, sino que toda la materia no era más que una amalgama de plasma. Se trata de un estado similar al gaseoso, pero en el que, a diferencia de cualquier gas, la electricidad atraviesa sus moléculas sin dificultad haciendo que esta sea visible a simple vista.

Será poco después, en el  $10^{-12}$ , cuando la fuerza nuclear débil y la electromagnética se separen definitivamente. Tras producirse esta ruptura espontánea, las partículas fundamentales adquirieron masa vía el mecanismo de Higgs, apareciendo los primeros neutrinos. La masa de un neutrino es apenas la mil millonésima parte de la de un átomo de hidrógeno, lo que facilitó que pudiesen viajar libremente entre aquella sopa de plasma ultra caliente y conformar, posteriormente, partículas más pesadas. Hasta el momento  $10^{-2}$ , el plasma que conformaba el universo no se había enfriado lo suficiente como para permitir la formación de neutrones y protones, partículas esenciales para estructurar a los primeros átomos estables.

Durante los próximos tres minutos, la temperatura del universo desciende considerablemente y las partículas subatómicas, que ya estaban presentes, dieron forma a los primeros elementos químicos conocidos por el ser humano. Al finalizar esos primeros instantes, los núcleos de hidrógeno eran unas tres veces superior a los del helio (el segundo elemento más abundante), y, a su vez, ambos estaban muy por encima en número del resto de compuestos. Tardarán unos 70 000 años en estabilizarse. A los 300 000 años, la materia comienza a ser abundante. El universo, su materia, energía y, en especial, el tejido espaciotemporal, empiezan a ser reconocibles.

*"Es difícil imaginar cómo podría haber sido el universo durante sus primeras fracciones de segundo, cuando sus temperaturas y densidades eran enormes y las leyes de la física que conocemos hoy podrían haber sido muy diferentes de lo que son ahora. Pero gracias a la física de partículas, podemos hacer algunas conjeturas educadas sobre lo que pudo haber sucedido. La evidencia de que el universo se expandió desde un estado denso y caliente, que llamamos el Big Bang,*

---

<sup>11</sup> Los cronones son una unidad hipotética de medida del tiempo propuesta en la física teórica. Según esta teoría, el tiempo no es continuo, sino que está formado por pequeñas unidades discretas de tiempo, que se denominan cronones. No hay evidencia experimental que respalde su existencia, sin embargo, algunos físicos teóricos sugieren que podrían ser una herramienta útil para entender ciertos problemas en la física cuántica y en la unificación de las teorías de la relatividad y la mecánica cuántica.

*es abrumadora. En el momento del Big Bang, todas las partículas del universo estaban concentradas en un punto infinitesimal, y desde entonces se han expandido para formar el vasto cosmos que vemos hoy" (Weinberg, 1977: 155)*

Este capítulo cierra el primer bloque temático del presente TFM. A lo largo de estas páginas, hemos intentado realizar una aproximación sucinta a la manera en que se han ido conformando y articulando nuestros estándares cosmológicos actuales. Pasamos ahora a un segundo bloque en el que presentaremos los problemas que este modelo inflacionario tiene en relación a nuestra comprensión del tiempo. Un tiempo que, recordemos, es poliédrico y con una arquitectura ontológica extremadamente compleja. Limitaremos nuestro estudio a las directrices cosmológicas que nos marcan la relatividad y la inflación, así como a la singularidad y el futuro del cosmos.

\* \* \* \* \*

## **9. LA COMPLEJIDAD DE LA ACTUAL COSMOLOGÍA**

Estos modelos matemáticos a los que nos hemos referido son la base sobre la que se construye la cosmología contemporánea. Resultan predictivos y muy acertados en sus cálculos. Sin ellos, sería imposible comprender ciertos fenómenos que escapan a nuestra relación cotidiana con la naturaleza, como el comportamiento de la luz cuando se desplaza cerca de objetos muy masivos o describir el flujo del tiempo en viajes a altas velocidades.

La cosmología se ocupa de interpretar estos modelos físicos y matemáticos para ofrecer explicaciones racionales acerca de cómo funciona el universo, pero no siempre fue así. A lo largo de la historia, cosmólogos de alto prestigio recurrieron a los mitos, la teología, la metafísica o el azar para intentar solventar muchos de los problemas que encontraban a la hora de articular un discurso coherente sobre el origen del cosmos y su evolución.

Los modelos físicos son una cosa, la cosmología es otra. Las ecuaciones describen el tejido espaciotemporal y la forma en que la luz o la materia interactúan con él, pero no dan una razón de porqué se produce la inflación inicial, por ejemplo. Cuando los experimentos demuestran que los sistemas matemáticos son adecuados, la cosmología trabaja intensamente para intentar encajar todas las piezas del puzle bajo un paradigma comprensible y racional. Son dos tareas diferentes pero indisolubles.

Hoy día, gracias al auge de las nuevas tecnologías y redes sociales, la cosmología es más accesible que nunca. Con toda seguridad, no encontraremos otro período histórico que presente un interés mayor por el universo que este. Si vamos a la red, encontraremos con mucha facilidad vídeos divulgativos de profesores, estudiantes o científicos autodidactas hablando sobre los últimos avances y descubrimientos astronómicos o a biólogos haciendo ejercicios creativos para imaginar cómo sería la vida en otros mundos. Pero también se explora el universo en los cómics, la literatura o el cine. Decenas, incluso cientos de películas y series han abordado esta temática. La cosmología vuelve a ocupar un puesto central en los programas divulgativos de ciencia, en las facultades de filosofía y en las discusiones a pie de calle.

Sin embargo, la cosmología moderna ha abandonado su pretensión de verdad filosófica (Arana, 2012). Su interés pasa por amoldarse a los modelos que la física le regala, sin cuestionar ni objetar absolutamente nada. Incluye en sus discursos conceptos complejos y términos poco descriptivos con el único fin de mostrarse amigable con las soluciones matemáticas. A lo largo del siglo XX, y desbordada por los avances de la ciencia, la cosmología se contentó con ocupar un papel secundario, y se sometió voluntariamente a los caprichos de la experimentación científica. Quizás, el último gran intento por hablar de cosmología con mayúsculas fue el de Lemaître, que supo discurrir una solución cosmológica de una ecuación matemática.

A diferencia de las generaciones que nos precedieron, estudiamos el cosmos como algo ajeno a nosotros, como si formásemos parte de él por casualidad. Los principios humanos ya no son válidos para explicar el universo y, en consecuencia, tanto Dios como el hombre, han quedado excluidos de todas las explicaciones cosmológicas, siendo únicamente válidas aquellas que se muestren de acuerdo con la física. Nuestro planeta ocupa una posición ridícula y minúscula en el universo, aun siendo, hasta donde sabemos, el único lugar en el que podemos encontrar vida inteligente. No exenta de delitos y faltas, por supuesto, pero racional, al fin y al cabo. Desvelar los secretos del cosmos se ha convertido en un imperativo para los gobiernos que buscan demostrar su poderío tecnológico y científico, motivados únicamente por la financiación y las recompensas que esta exploración pueda generarles.

Se trata, en definitiva, de recuperar una cosmología tradicional que resulte amigable con la física, pero no enemiga del humanismo. Una cosmología en la que las virtudes del hombre, como la razón y la curiosidad, no sean menospreciadas y devaluadas hasta convertirlas en simples anécdotas. Recuperar el gusto por las preguntas y compromisos tradicionales, sin rechazar los avances y el progreso.

## **10. EL TIEMPO ‘ANTES’ DE LA SINGULARIDAD**

Los problemas de la cosmología moderna comienzan en los instantes previos a que el universo se constituyese como la entidad física que hoy conocemos. Como hemos visto, la mayoría de los científicos coinciden en que el origen de nuestro universo puede situarse en un punto de singularidad. Este término resulta difícil de explicar ya que no podemos imaginarlo como un átomo corriente, o como una cajita muy pequeña que contenía ‘cosas’ en su interior. La singularidad es un reducto infinitamente pequeño del tejido espaciotemporal donde se encontraba presente toda la energía del cosmos.

*"La evidencia observacional sugiere que, hace aproximadamente 15 mil millones de años, todas las cosas en el universo estaban concentradas en un punto muy pequeño y denso. A este punto se le llama la singularidad inicial, porque*

*todas las leyes conocidas de la física se descomponen allí. Es aquí donde la historia del universo como lo conocemos hoy en día comenzó, con la gran explosión del Big Bang. Después del Big Bang, el universo comenzó a expandirse y enfriarse, lo que llevó a la formación de galaxias, estrellas y planetas, y eventualmente a la vida tal como la conocemos" (Hawking, 1988: 35)*

Allí, por denominarlo de algún modo, las leyes de la física no operaban con normalidad. Puede ocurrir que aún no estuviesen constituidas o que, simplemente, procedieran bajo parámetros distintos a los actuales dadas las tendencias al infinito de las variables que se pueden identificar en ese instante. En cualquier caso, los modelos matemáticos no pueden ofrecer respuesta a esta problemática.

Por esta razón, la manera en que se articulan originalmente las leyes de la física es un problema recurrente para los cosmólogos. La solución más racional es pensar que se trata de una forma de organización autónoma del propio universo en respuesta a la composición y distribución de materia y energía. Afirmamos esto porque, ante la presencia de objetos que alteran sustancialmente el tejido espaciotemporal como los agujeros negros supermasivos, las leyes de la física no dejan de trabajar de la misma manera que lo hacen en cualquier otro lugar. Son invariables, al menos, en los límites del universo conocido. Dentro de un agujero negro, por ejemplo, desconocemos cómo se comportarían. Por eso, considerarlas como una forma de organización autónoma es una posibilidad, pero podría no ser la única. Existen lugares del cosmos en las que estas se verían tan alteradas que nos resultarían irreconocibles o que, incluso, aparezcan algunas que aún no conocemos.

Para ejemplificar esto, podemos recurrir a un experimento organizado a finales del año 2021 (*Muon g-2*) entre instituciones estadounidenses y europeas, que buscaba conocer en profundidad cómo funciona una partícula subatómica denominada *Muón*. Esta partícula ( $\mu^-$ ) pertenece al grupo de leptones y fermiones, siendo su *spin*  $\frac{1}{2}$  al igual que cualquier fermión<sup>12</sup>. Recordemos que un *spin* es una propiedad cuántica que describe el momento angular intrínseco de las partículas subatómicas, como los electrones, protones y neutrones. A diferencia del momento angular orbital, que se relaciona con la rotación de una partícula alrededor de un punto, el *spin* no tiene una analogía bajo los parámetros de la mecánica clásica. El *spin* de una partícula se expresa como un número cuántico y está cuantizado, lo que significa que solo puede tener valores discretos y específicos. El *spin* es una propiedad importante de las partículas subatómicas y tiene implicaciones en la física cuántica y la teoría cuántica de campos que no trataremos aquí.

Retomemos el asunto principal. El muón es una partícula cargada negativamente (muy similar al electrón) pero con una masa unas 200 veces mayor. En los estudios iniciales de esta partícula realizados

---

<sup>12</sup> En el TFG presentado en 2022 y titulado *El universo de Hubble: implicaciones filosóficas de la cosmología contemporánea*, se abordó el asunto del *spin* y sus repercusiones en la cosmología contemporánea.

entre las décadas de 1940 y 1950, se creyó que su masa debía situarse en un valor intermedio entre un protón y un electrón, por lo que se la denominó *mesón* (del griego *intermedio*) Con el tiempo, aparecieron otras partículas que tenían una masa similar, y, en consecuencia, se organizó un grupo denominado *mesones* del que todas formaban parte. El muon, sin embargo, no se comportaba como el resto de sus compañeras y los científicos comenzaron a pensar que no se trataba de una partícula más del entramado subatómico del universo. Al desintegrarse, se generaba un electrón y un par de neutrinos, justo lo contrario que el resto de las partículas del grupo mencionado. Desde finales de los 60, el muon comenzó a estudiarse de manera independiente. Años después se avanzó en su estudio y diferentes investigaciones confirmaron que un *antimuón* podía reemplazar al protón de un átomo, algo que ni siquiera entraba dentro de la imaginación de los físicos del momento: se habían encontrado los *átomos de muonio*. Hablamos de un átomo exótico, formado por un antimuón y un electrón. Durante su vida útil, que es realmente pequeña antes de colapsar, puede formar compuestos extraños como el cloruro de muonio o el muoniuro sódico (Jungmann, 2004: 14-15)

Este proceso de desintegración no obedecía a ninguna ley física conocida hasta entonces. Tengamos en cuenta que, para las cuatro grandes fuerzas naturales (gravedad, electromagnetismo, fuerza nuclear fuerte y fuerza nuclear débil) existen una serie de leyes que las gobiernan y organizan, pero las interacciones del muon y las posibilidades que ofrecía no parecían poder explicarse bajo los parámetros conocidos. En una entrevista a la BBC en el año 2022, los directores del programa de investigación *Muon g-2* comentaron lo siguiente:

“Sencillamente hemos descubierto que las interacciones de los muones no son compatibles con el modelo estándar” (Lancaster, M) “Esto resulta muy emocionante porque, posiblemente, estemos ante la posibilidad de un universo con nuevas leyes físicas, nuevas partículas y nuevas fuerzas de la naturaleza. Durante toda mi carrera, he buscado fuerzas y partículas más allá de las que ya conocemos. Tengo la certeza de que este descubrimiento cambiará la física” (Allanach.)

Lo que ocurre es que, según el modelo actual de la física, los muones deberían desintegrarse a cierta velocidad y, sin embargo, no solo no lo hacían, sino que devolvían una composición atómica completamente nueva. Las conclusiones provisionales de la investigación afirmaron que en el muon estaba operando una fuerza natural desconocida hasta el momento y gobernada por su propia ley. Descubrirla a través de la experimentación en el acelerador de partículas de Ginebra será el objetivo de estos científicos a lo largo de los próximos años, marcando la década de 2030 como el momento en que puedan ofrecer nuevas respuestas.

Pensar en las leyes naturales resulta de lo más paradójico y entretenido. Su estatuto ontológico es similar al del amor o la belleza, es decir, vemos su efecto en el mundo, mas nos resulta imposible señalar su ubicación. Es cierto que las leyes naturales están presentes en todo el universo, pero no es

que podamos acudir a un laboratorio para intentar modificar su composición como si se tratase de un experimento químico. Y, al igual que el amor o la belleza, estas también son codependientes, es decir, podemos pensar que existen de forma autónoma y cada una ocupa una parcela de la realidad donde opera y reina de manera soberana, pero no sería correcto. Las leyes de la física están interconectadas y son coherentes entre sí, lo que significa que no se pueden aplicar de manera aislada. Las diferentes teorías físicas están conectadas y son compatibles entre sí dentro de un marco teórico unificado. Por ejemplo, la relatividad general y la mecánica cuántica son dos teorías fundamentales en la física moderna que describen diferentes aspectos del universo, pero son congruentes entre ellas mismas y se complementan en ciertas situaciones, como en el estudio de los agujeros negros y el origen del universo. Las leyes naturales no son autónomas y, en consecuencia, no pueden operar de manera aislada.

Es más, imaginemos que, de alguna extraña manera, otra singularidad volviese a aparecer y de nuevo se generase un proceso inflacionario, no hay garantía alguna de que las leyes físicas volviesen a ser las mismas. Aquí nuestra imaginación se dispara y podemos crear universos con leyes alocadas y disparatadas que, si bien pueden parecer divertidas, no hay ninguna limitación lógica para que puedan obtener estatuto de realidad bajo el paradigma adecuado.

“La respuesta a todos estos interrogantes radica en que la teoría de un universo inflacionario únicamente podría darse suponiendo la existencia de unas increíblemente precisas condiciones iniciales. Estas condiciones iniciales se suponen, pero no se explican. [...] Ocurre lo mismo con la igualdad física de todos los puntos del universo” (Sánchez Ron, 2014: 231)

La problemática del tiempo es muy similar a la de la ontología de las leyes naturales. Como vimos, nuestra relación con él es siempre progresiva. Parece que este universo tiene incorporada una flecha del tiempo que se desplaza de atrás hacia delante, o desde el pasado hacia el futuro. No obstante, durante la singularidad, esto no está garantizado. No tenemos ninguna manera de comprobar cómo funcionaba el tiempo en ese estado primitivo y, mucho menos, de averiguar la manera en que adquiere presencia física en la singularidad. En otras condiciones universales, bajo el gobierno de otras leyes, el tiempo podría comportarse de una manera diferente, incluso, presentarse separado del espacio. Tenemos aquí un grave problema, y la física no puede socorrernos en tanto carece de cualquier herramienta teórica o práctica que pueda emplear en este asunto.

El proceso inflacionario que da lugar a nuestro universo tiene un carácter creador, en tanto construye el propio tejido espacio-tiempo a medida que se expande. Algo en lo que están de acuerdo cosmología y física es que hablar de un ‘antes’ de la inflación, carece de sentido. Más allá de la singularidad no existía realidad alguna. Absolutamente todo formaba parte de aquél primer *cuanto* de energía y, en

consecuencia, términos como ‘antes’ o ‘fuera’ pierden su significado. Debemos esforzarnos por huir de una representación mental en la que imaginamos el universo como un espacio vacío que se llena de la metralla que sale disparada después de la explosión de ese átomo primitivo<sup>13</sup>. De hecho, si pudiésemos viajar en este mismo instante hasta el confín del universo, a ese límite que afirman se encuentra a más de 90 mil millones de años luz de nosotros, lo que encontraríamos es esa misma ausencia de existencia, un vacío de realidad. Simplemente, no podríamos estar allí porque no existiría ese espacio.

## 11. LA DILATACIÓN TEMPORAL

La cosmología contemporánea acepta, con base en la relatividad, que el tejido espaciotemporal de nuestro universo es *continuum*, es decir, no hay separación entre una y otra realidad. Sin embargo, nuestros predecesores en la filosofía dedicaron grandes esfuerzos a comprender la esencia del tiempo y el espacio como dependientes, pero no fusionados. Tengamos en cuenta que, en nuestra relación cotidiana con el mundo, el tiempo y el espacio no se perciben de la misma manera. Yo puedo desplazarme más rápido o lento hacia un punto concreto, sin embargo, no puedo entorpecer el fluir del tiempo de ninguna manera; también soy capaz de quedarme quieto y sin moverme, pero observaré rápidamente que el tiempo sigue avanzando. Además, el espacio es fácilmente observable, detectable por los sentidos, no obstante, el tiempo solo puedo percibirlo cuando miro un reloj o pienso en él. El espacio está fuera de mí, puedo tocarlo, cambiar las cosas de sitio y controlarlo hasta cierto punto, con el tiempo nada de esto es posible. Transcurre sin cesar, esté yo quieto o en movimiento.

### 11.1 LA DILATACIÓN POR VELOCIDAD

La relatividad de Einstein llegó para decirnos que esto, que parece una verdad universal, tiene sus matices, dos concretamente: la velocidad y la gravedad. Cuanto mayor sea la velocidad de desplazamiento y/o cuanto más cerca estemos de un objeto masivo, mayor será la dilatación del tiempo. Lo que percibe un observador desde dentro del sistema y lo que observa otro desde fuera, cambia sustancialmente. Veámoslo a través de un sencillo ejemplo:

En primer lugar, tenemos la nave Sabrina I en la que se encuentra una científica llamada Sabrina. Ella porta un preciso reloj de pulso láser que mide el tiempo en intervalos secuenciales de manera mucho

---

<sup>13</sup> Cuando Newton habló de un ‘espacio absoluto’ era esta idea la que manejaba en sus argumentos. Un espacio inmenso, que se llenaba por la mano de Dios de materia, y que actuaba como una especie de cajón vacío o contenedor.

más certera que cualquier reloj a pilas. Este pulso emana desde un emisor y se refleja en un espejo, volviendo al punto de partida y siendo detectado entonces por un sensor. Este sensor señala el tiempo que ha pasado entre que se emitió el láser y volvió a su lugar original:  $\Delta t_s$ . Sabemos que la velocidad de la luz es constante, por tanto, todos los pulsos emitidos dentro del reloj tienen la misma duración. Así, es posible medir con mucha exactitud el tiempo dentro del marco de referencia de Sabrina (es decir, la nave en la que se encuentra)

Junto a la nave Sabrina I, hemos dispuesto otra de iguales características: la Arturus, en la que se encuentra un investigador de nombre Arturo. Para comprobar cómo la velocidad dilata el tiempo, la Sabrina I comienza su viaje mientras que la Arturus permanece estática.

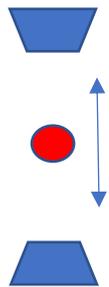
Sabrina se mueve a una velocidad elevada, cercana a la de la luz y se mantiene constante y en línea recta. Sin mirar hacia fuera de la nave y, por tanto, disponer de otros puntos de referencia visuales, ocurre lo que nos advirtió Galileo: como Sabrina comparte velocidad con el resto del sistema de referencia (la nave) le resulta imposible determinar si se encuentra en reposo o en movimiento con respecto a la Arturus. Sin embargo, Arturo, que no se está moviendo, ve desplazarse a Sabrina en línea recta<sup>14</sup>.

Cuando Arturo observa con más detalle la nave Sabrina I, se fija en el reloj de pulso láser. El comportamiento que él describe con respecto al reloj es totalmente diferente de lo que explica Sabrina. Para ella, el pulso se mantiene constante e invariable, rebotando en vertical una y otra vez sin alteraciones, a pesar de la enorme velocidad a la que viajan. Pero, para Arturo, esto no es así: él observa que el láser parece desplazarse en diagonal, como si tuviese que alcanzar al espejo. Esto ocurre porque el movimiento de la nave obliga a que el láser tenga que recorrer una distancia mayor para llegar hasta el espejo y de nuevo al sensor.

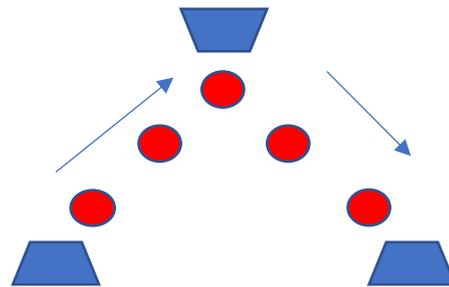
---

<sup>14</sup> Si consideramos la idea de que sea Arturo quien se mueve hacia atrás, mientras que Sabrina permanece inmóvil, el argumento no se vería alterado

PERSPECTIVA DE SABRINA



PERSPECTIVA DE ARTURO



Es decir, al pulso láser le cuesta un poquito más de tiempo ir desde el emisor al sensor dado que debe recorrer más distancia en movimiento que en reposo. Podemos denominar  $d_s$  a la distancia que recorre el pulso láser para Sabrina, y  $d_a$  para la distancia que observa Arturo. En el capítulo 5.1 vimos el segundo postulado de Einstein: la velocidad de la luz ( $c$ ) es absoluta. De esta forma, podemos calcular los intervalos de tiempo:

$$c = \Delta d_s / t_s = \Delta d_a / t_a$$

Como  $d_a$  es mayor que  $d_s$ ,  $\Delta t_a$  debe ser mayor que el  $\Delta t_s$  con el fin de que las proporciones tengan el mismo valor que  $c$ .

Einstein expuso un caso diferente para ejemplificar este fenómeno: la paradoja de los gemelos. Para realizar este experimento mental, necesitamos a dos gemelos idénticos, A y B. Uno de ellos, A, se quedará en la Tierra, mientras que el otro, B, viajará en una potente nave espacial a una velocidad cercana a la de la luz (que es de 300 000 km/s) Debido a los efectos de la dilatación del tiempo, el gemelo B experimentará el tiempo de una manera diferente a como lo hará A durante el período en que este se encuentre de viaje. En concreto, el tiempo transcurrirá de forma más lenta para el gemelo B, debido, precisamente, a la alta velocidad a la que se desplaza. Como resultado, cuando el gemelo B se reencuentra en la Tierra con su hermano, será posible observar que A parece mucho más viejo que B, a pesar de que ambos gemelos experimentaron el mismo tiempo desde su punto de vista, es decir, desde su propio sistema de referencia.

*“La clave para entender la dilatación temporal es que la relatividad no considera un marco de referencia absoluto. Es decir, la velocidad es relativa y depende del marco de referencia desde el que se mide. Por lo tanto, desde el marco de referencia de A en la Tierra, B se mueve a velocidades cercanas a la velocidad de la luz y su tiempo se dilata. Esta paradoja de los gemelos ha sido una fuente de confusión para muchos, pero es un resultado directo de la teoría de la relatividad. La teoría ha sido confirmada en muchos experimentos, y es una de las teorías más sólidas y bien establecidas de la física moderna” (Einstein, 1938)*

Con esta paradoja, Einstein quiso contradecir la idea de que el tiempo es un fenómeno absoluto e invariable (defendida, entre otros, por Newton), y sugiere que la experiencia del tiempo depende del marco de referencia de un observador y su movimiento en relación con otros objetos del universo. Todos los fenómenos que podamos replicar en los que exista un observador estacionario frente a uno que se mueva a velocidad elevada, tendrán el mismo efecto: la luz no varía su velocidad, pero en cada uno de los sistemas el movimiento del reloj se percibe de manera diferente. A pesar de esto, es necesario recordar que, a velocidades cotidianas, es más práctico aplicar la mecánica clásica<sup>15</sup> y las leyes de Newton. De esta forma, reducimos el número de ecuaciones y los resultados son bastante similares. No necesitamos recurrir a la relatividad para calcular la velocidad de rotación de nuestro planeta, por ejemplo.

## 11.2 LA DILATACIÓN TEMPORAL GRAVITACIONAL

Al igual que la velocidad, la gravedad también puede ralentizar el tiempo (en condiciones muy concretas). No se trata, de forma estricta, de un fenómeno diferente al anterior, sino de una consecuencia distinta al estar ocasionada, no por el movimiento, sino por la presencia de un objeto masivo como una estrella de neutrones. Los objetos que se encuentran en campos gravitatorios distintos, como la luna o un planeta que orbite una estrella super masiva, experimentarán tasas de flujo de tiempo diferentes. La dilatación del tiempo por efecto de la gravedad se ha demostrado experimentalmente en varias ocasiones. Una de ellas fue el experimento de verificación de la relatividad general realizado por el físico estadounidense Robert Pound y su equipo en la década de 1960. De forma sucinta, podemos comentar que estos trabajos de investigación fueron de los primeros en proporcionar evidencia directa de la teoría de la relatividad general de Einstein. El experimento se centró en la medición de la dilatación gravitacional del tiempo, que es una predicción clave de la teoría de la relatividad general. Se llevó a cabo utilizando un haz de neutrones emitidos por una fuente y reflejados por un espejo. Los neutrones se hicieron pasar por un campo gravitacional generado por una masa pesada colocada cerca del camino del haz de neutrones. Al medir la diferencia en el tiempo de vuelo de los neutrones que pasaron por el campo gravitacional y los que no lo hicieron, Pound y su equipo pudieron medir la dilatación del tiempo causada por la gravedad. Los resultados presentados

---

<sup>15</sup> La mecánica clásica funciona en sistemas de referencia que se mueven a baja velocidad, mientras que la mecánica relativista es útil en aquellos que se desplazan a velocidades cercanas a la de la luz. Existe otra rama general en física conocida como mecánica cuántica que se ocupa del estudio de objetos muy reducidos en tamaño, a escala atómica.

fueron consistentes con las predicciones de la teoría de la relatividad general, y proporcionaron una confirmación importante de la teoría de Einstein. Además, el experimento también ayudó a demostrar la importancia de la teoría de la relatividad general en la física moderna y en la articulación de la cosmología contemporánea.

*"Este experimento es una ilustración clara de la teoría de la relatividad de Einstein. La idea básica de la relatividad es que el tiempo pasa más lentamente cerca de una fuente de gravedad fuerte. Es lo que llaman dilatación del tiempo. La prueba de que la teoría es correcta en nuestro experimento fue que el tiempo que medimos en la superficie de la Tierra pasó más rápidamente que el tiempo que medimos en una fuente de gravedad más débil"* (Pound, 1997)

Un ejemplo más concreto de la dilatación del tiempo por gravedad es el efecto observado en los relojes atómicos ubicados a diferentes altitudes sobre la Tierra. Debido a que la gravedad es más débil en altitudes mayores, los relojes situados a mayor altura se mueven más rápido y experimentan una dilatación temporal menor que los relojes situados a nivel del mar.

A diferencia de la ley de la gravitación universal propuesta por Newton, la teoría de la relatividad general postula que la gravedad no es una fuerza que actúa entre dos objetos (atractiva), sino que es una manifestación de la curvatura del espacio-tiempo causada por la presencia de grandes cantidades de masa y energía. Es decir, que esa curvatura afecta de forma directa a la manera en que el tiempo transcurre cerca de ese espacio.

## **12. LOS VIAJES A TRAVÉS DEL TIEMPO**

No vamos a ocuparnos aquí de pseudociencia o ciencia ficción, sino de aquello que nos dice la relatividad acerca de un posible viaje en el tiempo. Esta idea es utilizada habitualmente en física para evaluar las consecuencias que la relatividad y la teoría cuántica de campos tienen sobre la naturaleza.

De acuerdo a las formulaciones de la relatividad general, las partículas de materia se mueven en el espacio en tres direcciones (x, y, z) y hacia adelante en el tiempo. De hecho, ahora mismo nos encontramos viajando en el tiempo, concretamente a razón de una hora por hora. La cosa es averiguar si, bajo los parámetros relativistas, podríamos ir más despacio o más deprisa (Riveiro, 2015)

Hemos visto la manera en que el desplazamiento a velocidades cercanas a la luz dilata o ralentiza el tiempo. Si nos encontrásemos dentro de nuestra nave Sabrina I y mirásemos por la ventanilla, parecería que el tiempo 'externo' pasa más deprisa, y, de hecho, así es. Cuando volvemos a la Tierra, descubrimos (como ocurrió con los gemelos) que todos nuestros amigos y familiares son mucho

mayores que nosotros. En otras palabras: hemos invertido dos años de nuestra vida para volver a una Tierra en la que han pasado cuarenta, por ejemplo.

Aunque, a día de hoy, no existe ninguna evidencia experimental sobre estos, sí podemos encontrar razones teóricas y cálculos matemáticos para considerar que este tipo de viajes ‘al futuro’ serían viables con la inversión adecuada de recursos y tecnología. Por el contrario, no es probable que nuestro universo permita viajes al pasado. Una cosa es intercambiar dos años de nuestra vida a cambio de regresar a un planeta futurista, y otra bien distinta movernos en el tiempo como lo hacemos en el espacio. Esto ocurre porque no tenemos habilitadas líneas temporales cerradas. En una variedad lorentziana<sup>16</sup> de la geometría diferencial, una curva cerrada de tiempo (o curvatura temporal cerrada) es una línea que está cerrada en el tejido espaciotemporal, de tal manera que una partícula de materia podría regresar al mismo estado del que partió en el tiempo después de recorrer una determinada distancia. La opción teórica que se ofrece para solventar este problema serían los denominados *agujeros de gusano*, unos atajos en el tejido espaciotemporal que nos permitirían viajar de un punto a otro del espacio rápidamente.

El otro argumento que se esgrime contra el viaje en el tiempo es el de la causalidad. Así, aparecen ciertas paradojas que imposibilitan que una persona pueda viajar al pasado y volver, sin consecuencias desastrosas, al punto de inicio. Un ejemplo típico de esto es imaginar que alguien logra construir un artefacto para viajar en el tiempo y regresa diez años atrás, en ese momento destruye los planos originales de la máquina. Se produciría entonces una alteración grave de la línea de tiempo principal que, de momento, no somos capaces de resolver con la relatividad.

Recientemente, se ha publicado un artículo desde la Universidad de Maryland (EEUU) a cargo de los físicos Igor Smolyaninov y Yu-Ju Hang. Gracias a una gran inversión en computación e infraestructura, han diseñado un pequeño dispositivo capaz de simular el nacimiento de un nuevo universo. Su tamaño es de apenas veinte micrómetros de ancho, y lo recubren franjas de oro y plástico

---

<sup>16</sup> La variedad lorentziana es un objeto matemático utilizado en la geometría diferencial para describir el espacio-tiempo de la relatividad especial y la relatividad general. En la geometría diferencial, una variedad es un espacio matemático que puede ser localmente aproximado por un espacio euclidiano. La variedad lorentziana se caracteriza por su estructura métrica, que es la forma en que se mide la distancia entre dos puntos en el espacio-tiempo. Esta métrica se llama métrica de Minkowski y es de tipo Lorentz, lo que significa que tiene una mezcla de componentes positivas y negativas. Esta métrica es esencial para la formulación de la teoría de la relatividad especial y la relatividad general.

La geometría lorentziana se utiliza para describir cómo los objetos y eventos se mueven y se relacionan en el espacio-tiempo. Esta geometría difiere de la geometría euclidiana en varios aspectos importantes, como la curvatura del espacio-tiempo debido a la presencia de la materia y la energía.

para protegerlo. Los metamateriales<sup>17</sup> utilizados son extremadamente raros, y, entre sus múltiples facultades, se encuentra la de doblar o manipular la luz de formas inusuales. El movimiento dentro del dispositivo es similar al de nuestro universo de tres direcciones y, además, contempla un desplazamiento en vertical que simula el movimiento a través del tiempo. La investigación contempló el despliegue de unas partículas similares a los fotones, con tan poca masa que pudiesen viajar en todas las direcciones posibles. Sin embargo, la propia entropía del sistema hacía que, una vez que estas partículas se alejaban demasiado del punto de partida, ya no podían encontrar el camino de regreso. De manera sucinta, el estudio concluyó que el viaje en el tiempo resulta imposible, por mucha tecnología que logremos desarrollar.

Lawrence Krauss (Universidad de Arizona, EEUU) se ha mostrado escéptico ante estos resultados. Considera que este tipo de metamateriales no se ajustan adecuadamente a la realidad de la singularidad. Además, señaló que el Big Bang original tuvo un componente de arbitrariedad que aquí no está contemplado. Por su parte, Andreas Albrecht (Universidad de California, EEUU) también criticó esas conclusiones. Para Albrecht, este experimento no descarta totalmente la posibilidad de viajar en el tiempo ya que, teóricamente, la relatividad no impide que se puedan generar universos donde los ciclos de la entropía suban y luego vuelvan a estabilizarse.

A favor de los viajes en el tiempo no es posible ofrecer mucha argumentación como vemos, sin embargo, a falta de pruebas empíricas, no podemos descartar todavía que estos sean posibles. Tematicemos la cuestión a través del filósofo medieval Guillermo de Ockham. Este monje franciscano defendió la idea de que, en igualdad de condiciones, la explicación más simple suele ser la más probable. Siguiendo esta postura, tendríamos que la teoría más sencilla nos dice que no es posible viajar en el tiempo ya que esta dimensión no puede desdoblarse para volver a reescribir la historia. En ciencia, este principio puede utilizarse como regla general para guiar a los investigadores hacia los modelos teóricos más sencillos y prácticos. Sin embargo, el hecho de que sea la explicación más probable no implica, necesariamente, que sea la verdadera. Muchas veces la teoría más enrevesada resulta ser la correcta, a pesar de las probabilidades en contra. El franciscano apostilló que, si no es contradictorio, puede existir. Así, imaginar un universo fractal a escala hiper galáctica no es nada descabellado. Se trataría de un cosmos en el que existe una estructura repetitiva y estable que permitiría crear líneas de tiempo cerradas. Los potentes super telescopios como el James Webb, podrían desvelar

---

<sup>17</sup> Junto con su origen artificial, los metamateriales se caracterizan por presentar propiedades electromagnéticas inusuales, procedentes de su estructura y ordenación y no de su composición.

la estructura general del universo dentro de algunos años y, en consecuencia, alterar los actuales paradigmas de trabajo en este sentido.

Pensando con lógica, parece sensato que el viaje en el tiempo no es viable dentro de nuestro universo. No solo la causalidad, sino la geometría y las leyes físicas parecen posicionarse en contra. Sin embargo, la discusión sigue abierta en tanto no tengamos pruebas sólidas que puedan descartarlos, aunque las propuestas suenen demasiado imaginativas.

### **13. LA FLECHA DEL TIEMPO**

El tiempo posee dos características distintivas con respecto al espacio: es unidimensional y lineal; mientras que el espacio resulta ser tridimensional<sup>18</sup> y permite movilidad total. Esta linealidad o progresión temporal, que en nuestra experiencia con el mundo apenas resulta perceptible en tanto es algo cotidiano y habitual, fue conceptualizada en 1927 por el astrónomo británico Arthur Eddington. Con el término *flecha del tiempo*, Eddington quiso reflejar, de forma simbólica, ese carácter rectilíneo que articula el tiempo. Aunque la conclusión es la misma (que el tiempo se percibe de forma rectilínea), los caminos para llegar hasta ahí pueden ser diferentes dependiendo del prisma que utilicemos para construir la teoría. Así, la física, la psicología o la religión, tienen flechas del tiempo con el mismo significado, pero operando bajo presupuesto iniciales bien distintos.

#### **13.1 LA FLECHA DEL TIEMPO TERMODINÁMICA**

El principio de conservación de la energía, o primer principio de la termodinámica, nos dice que la cantidad total de energía de un sistema físico aislado (es decir, sin ninguna interacción con otros sistemas) permanecerá siempre igual, excepto cuando se transforme en otros tipos de energía (Coluccio, 2021) De esta forma, podemos ver que la energía de nuestro universo no puede crearse ni destruirse, solo se transforma en otros tipos como la eléctrica, calórica o lumínica. Este proceso de intercambio, o búsqueda de estabilidad térmica, ocurre en todas las interacciones físicas del cosmos.

---

<sup>18</sup> En teorías físicas más avanzadas, como la teoría de cuerdas o la teoría M, se postulan más dimensiones espaciales adicionales, que podrían ser compactas y no ser perceptibles directamente a escalas macroscópicas. Sin embargo, estas teorías aún no han sido confirmadas empíricamente. En la física clásica y en la física moderna estándar, se asume que el espacio tiene tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal.

“De acuerdo al principio de conservación de la energía, al introducir en un sistema una cantidad de calor (Q) determinada, ésta será siempre igual a la diferencia entre el aumento de la cantidad de energía interna ( $\Delta U$ ) más el trabajo (W) efectuado por dicho sistema. De esta manera, tenemos la fórmula:  $Q = \Delta U + W$ , de donde se desprende que  $\Delta U = Q - W$ ” (Coluccio, 2021)

En ese traspaso o transferencia de energía se produce, invariablemente, un desorden. La estructura inicial cambia, como un cubito de hielo que se derrite a temperatura ambiente. En consecuencia, la entropía suele entenderse como el grado de homogeneidad o desorden de un sistema. Sin embargo, hay casos particulares en los que la entropía no es directamente proporcional al desorden, sino que, durante algunas fases del proceso emerge una fase ordenada. Cuando miramos con detalle al cosmos, tenemos la sensación de que estamos observando una existencia ordenada, pero, en realidad, como desconocemos su punto de inicio y de final, nos resulta imposible determinar en qué momento se encuentra. Lo único que podemos deducir es que está en desarrollo, en evolución y, por tanto, se está produciendo un progreso temporal en busca de equilibrio.

La entropía del universo tiene un único sentido creciente, hacia delante. Es comparable a nuestra percepción del tiempo, siempre progresivo. El tiempo pasa, y la entropía crece hasta que alcance el punto denominado como de *máxima entropía*, o equilibrio térmico. La entropía solo puede incrementarse según afirma el segundo principio de la termodinámica. No existe forma alguna en que decrezca. Algunos físicos como Stephen Hawking han reflexionado acerca de los posibles destinos finales del universo, entre ellos una muerte térmica en la que ya no se produzca más transferencia de energía, o una gran implosión en la que el universo comienza a contraerse por haber alcanzado el límite gravitacional crítico. En ningún caso, la flecha del tiempo invertiría su sentido: “*No tiene sentido imaginar que las gentes vivan sus vidas hacia atrás, es decir, hacia el nacimiento*” (Hawking, 1988) No hay ninguna posibilidad, por decirlo con otras palabras, de que un suceso que ya haya tenido lugar en nuestro universo lineal se contradiga espontáneamente y vuelva a recomponerse. La energía que ya se transfirió, así como los sucesos ocurridos, son irreversibles. Este principio, además, tiene mucho que ver con la imposibilidad de líneas de tiempo cerradas que habilitasen un posible viaje en el tiempo.

## 13.2 LA FLECHA DEL TIEMPO PSICOLÓGICA

La flecha termodinámica del tiempo queda completada en los últimos años con varios estudios de naturaleza química y biológica. Autores como Prigogine<sup>19</sup> han destacado ese carácter inalterable del

---

<sup>19</sup> Ilya Prigogine 1917 - 2003, fue un químico y físico de origen ruso. Premio Nobel de química en 1977 por sus estudios sobre los sistemas alejados del equilibrio térmico.

tiempo indicando que esa irreversibilidad no depende solamente de la ínfima probabilidad de que un suceso que genera mayor entropía pueda darse al revés, sino que el carácter direccional del tiempo y su irreversibilidad son indisolubles, inseparables. (Enciclopedia Herder de Filosofía, 2017) No es que esta sea consecuencia de aquella, son lo mismo. Esa diminuta probabilidad es, aunque la ciencia diga lo contrario, despreciable.

Desde una perspectiva biológica puede entenderse mejor. Sucesos como el nacimiento, la muerte o aprender a caminar no pueden deshacerse, con independencia de nuestros deseos. No hay probabilidad alguna de que así ocurra. Los humanos nos hemos acostumbrado a este carácter incorregible e ingobernable del tiempo y nos organizamos culturalmente en torno a él. Por ejemplo, construimos bibliotecas para almacenar documentos antiguos o practicamos determinados rituales que mantienen vivas costumbres y tradiciones ancestrales. El pasado convive con nosotros muchos más que el futuro. A esto, se le denomina también como flecha psicológica del tiempo y nos permite reconocernos en el mundo.

### 13.3 LA FLECHA DEL TIEMPO COSMOLÓGICA

Como hemos comentado, la cosmología contemporánea trabaja con la idea de un universo en expansión. Si imaginamos que el arco que dispara la flecha de Eddington es el Big Bang, es posible establecer una secuencia aditiva de años para fijar la edad del universo en unos 14 000 millones. Una cantidad que excede por mucho nuestra capacidad imaginativa. Esa percepción de atrás hacia delante, del pasado hacia el ahora, es la flecha del tiempo cosmológica. Para Stephen Hawking, la flecha termodinámica, la psicológica y la cosmológica, no son más que manifestaciones distintas de un mismo fenómeno (Hawking, 1988) Todas las flechas confluyen de igual manera sobre el principio antrópico<sup>20</sup> y son necesarias para comprender la estructura biológica, cultural y antropológica del ser humano.

### 13.4 LA FLECHA DEL TIEMPO RELIGIOSA

A pesar de todo lo expuesto hasta ahora, la noción de una flecha del tiempo es relativamente reciente. La historia ancestral de la humanidad está cargada de concepciones míticas y religiosas que no compartían esta linealidad progresiva del tiempo. No concebían un cosmos con origen y final, es decir,

---

<sup>20</sup> Término introducido por el cosmólogo Brandon Carter en 1973 (siguiendo orientaciones de Gerald Whitrow) para explicar las condiciones que hacen posible la existencia del ser humano en el universo. En particular, dicho principio explica por qué el universo es tan grande respecto del ser humano y cómo es posible -cosmológicamente hablando- nuestra existencia y, en general, la de cualquier forma de vida (Biblioteca Herder de Filosofía, 2017)

un tiempo que avanzaba desde el pasado hacia el futuro. El tiempo cíclico de estas tradiciones supuso el primer intento racional por comprender el discurrir del tiempo. En los primeros milenios de la historia humana, las civilizaciones nómadas vivían en profunda comunión con la naturaleza. Esto les ayudó a observar con detenimiento el orden natural de las cosas y las leyes que regían el cosmos de manera permanente, por ejemplo: el recorrido circular del Sol o la Luna, las estaciones del año o la muerte de los seres biológicos. Como estos fenómenos se repetían sin cesar, el ser humano primitivo estableció un paralelismo entre el tiempo y la naturaleza. Así, la concepción de un retorno o renacimiento constante en el cosmos comenzó a gestarse y a ocupar un lugar preminente en la cosmología primitiva. (Figura 8, calendario azteca) En las culturas americanas precolombinas tenemos varios ejemplos de esta particular manera de entender el paso del tiempo. Veamos algunos ejemplos:

Los mayas, que ocuparon parte del centro de América durante miles de años, fecharon el inicio del mundo en torno al 3114 a.C.<sup>21</sup> Pero este calendario se elaboró en base a registros anteriores de un pueblo mucho más antiguo: los Mixe-Zoque. Pero este hecho no obedecía a un presupuesto teológico o mítico, sino astronómico. Gracias a esa fecha, los mayas eran capaces de predecir con gran exactitud eclipses e irregularidades en ciertas estrellas móviles (los planetas visibles) porque les ayudaba a fijar el día en que se produciría el fenómeno concreto. Si, por el contrario, no tenían un momento desde el que empezar a predecir, la tarea se habría vuelto compleja de manera innecesaria. A diferencia de las concepciones cosmológicas de las religiones monoteístas, el tiempo, para la civilización maya, era una deidad en sí misma, y, por tanto, no tenía fin. El tiempo, como Dios, era inmortal. De esta forma, la cosmovisión del mundo maya no contemplaba ni un inicio ni un final del universo, tan solo la circularidad de la naturaleza (Menares, 2014).



Los aztecas, o mexicas, que habitaron cerca del actual México, realizaron tareas de investigación astronómica al mismo nivel que sus vecinos. Articularon calendarios muy complejos con los que organizar cosechas, fiestas y eventos. La mitología tenía una fuerte presencia en su concepción del tiempo. Los dioses organizaron el cosmos y su eterno retorno. De manera cíclica, todo regresaba al mundo y el hombre era considerado un ser privilegiado al recibir el regalo de la sabiduría por parte de las deidades. A la izquierda del texto,

---

<sup>21</sup> Esta fecha se ajusta a nuestra actual manera de contabilizar los años. Los mayas redactaron este calendario siglos antes del nacimiento de Cristo.

figura un calendario azteca fotografiado a finales del siglo XX en una expedición realizada en Centroamérica (*figura 7*)

Una variante de estas comprensiones temporales las encontramos al sur de Chile, con el pueblo mapuche. Se trata de la cultura indígena más numerosa de toda Suramérica y una de las más antiguas de las que tenemos registro. Para los mapuches, el tiempo no presenta ese carácter unidireccional propio de la modernidad, ni una facultad cíclica, sino bidireccional. Para ellos, el universo es una red viva (que no un dios) por la cual circula la energía cósmica y la información. La naturaleza creada por los dioses se encarga de autorregular este flujo de poder. De esta forma, todo queda íntimamente interconectado por lo que el pasado y el futuro no están delante o detrás del presente, sino fusionados. No hay partes separadas. El *We tripantu* es el fin del año natural y el nacimiento de uno nuevo, pero que no viene a sumar años a la historia universal, sino que se trata de otro ciclo conectado con el todo. Ya que la totalidad de la existencia está presente siempre, no tiene sentido contar los años al modo que lo hacían otras culturas contemporáneas (Canio Llanquinao, 2014)

En la Grecia clásica, el tiempo se concebía bajo las estrictas normas de la naturaleza, donde el pasado o el futuro carecían de relevancia. No hay pensamiento histórico (Marín Casanova 2022). Para la cultura griega, el pasado está siempre insertado en la actualidad del mito, y, en consecuencia, todo tiempo es presente continuo, al estilo mapuche. Pero, con la incursión del cristianismo, occidente rompió este esquema, como tratamos brevemente en el capítulo 2 del presente trabajo.

En conclusión, percibimos el tiempo en una única dirección progresiva. Nuestra psicología y la manera en que articulamos nuestra cultura son propicias a esta idea. La mitología más primitiva entendía el universo bajo presupuestos religiosos e intentaba construir una cosmología adecuada para que esos principios no se viesen alterados. En la modernidad, la observación y experimentación han pasado a ocupar un lugar central y, sobre ellas, se articula nuestra particular cosmovisión. Nada nos garantiza que en el futuro entendamos el tiempo de la misma manera. Cambios culturales, nuevos descubrimientos o teorías físicas actualizadas podrían alterar el paradigma universal del tiempo. Sin embargo, la física actual se muestra especialmente amable con la progresión lineal del tiempo, lo que alimenta nuestras esperanzas de que nos encontremos en la línea de investigación correcta.

## 14. LOS DEBATES ACERCA DE LA NATURALEZA DEL TIEMPO

La naturaleza del tiempo continúa a día de hoy siendo objeto de estudio, reflexión y debate. La lista de autores que han tratado el tema del tiempo es inagotable, y abarca prácticamente todas las corrientes y movimientos filosóficos. Uno de los mejores ejemplos de esto ocurrió entre 1715 y 1716. Durante esos años, tuvo lugar la famosa correspondencia entre los filósofos Gottfried Wilhelm Leibniz y Samuel Clarke en nombre del propio Isaac Newton. En esas cartas, ambos autores discutieron acerca de cuestiones filosóficas, físicas y teológicas. Particularmente, abordaron los conceptos de tiempo y espacio en tanto dependientes de Dios.

Leibniz argumentó que Dios había creado el universo de tal manera<sup>22</sup> que este resultaba ser el mejor de los mundos posibles. Recurriendo al principio de razón suficiente, Leibniz defendía la idea de que Dios era necesario para explicar la existencia y el orden del universo. *“Debe existir una razón suficiente para que cualquier cosa exista, para que cualquier evento se produzca y para que cualquier verdad se pueda obtener”* (Alexander, 1956: 11 - 12) El cosmos estaba diseñado para que funcionase de manera autónoma en consonancia con las leyes de la naturaleza. Sin embargo, Clarke discrepó de esta idea de autonomía. En su opinión (y también en la de Newton) Dios no se desentendía de su creación, al contrario, participaba de forma habitual en el mundo con el fin de arreglar aquello que pudiese estar dañado o corrupto. Leibniz denominó a este Dios como un relojero poco hábil pues su creación (la naturaleza, el cosmos) necesitaba de continuas reparaciones. Escribe Leibniz:

*“Yo no digo en absoluto que el mundo corporal sea una máquina o reloj que funciona sin la intervención de Dios, sino que opino que las criaturas tienen necesidad de su continua influencia, pero sostengo que es un reloj que funciona sin tener necesidad de corrección. De otra manera, sería decir que Dios se equivoca”* (Alexander, 1956: 16-17)

En cualquier caso, Clarke respondió que el espacio y el tiempo actuaban como un *sensor* divino u órgano a través del cual Dios recibía información. Como el espacio y el tiempo eran realidades absolutas, Dios no encontraba impedimentos para utilizarlas a conveniencia. Otra cosa serían el tiempo y espacio relativos, es decir, aquellas percepciones que recibimos de acuerdo a nuestra relación con el entorno, relativas a nuestros sentidos. Para Leibniz, esto no tenía sentido alguno: *“no hay expresión menos conveniente sobre este tema que aquella que da a Dios un sensorium, pues parece que le hace alma del mundo”* (Alexander. 1956: 22) Y lo defiende en base a dos razones: en primer lugar, Dios, en su majestad, no necesita recibir información a través de ningún sensor pues ya todo es conocido por Él desde antes de la creación del mundo. En segundo, si existiese un espacio y tiempo absolutos, esto

---

<sup>22</sup> Esta teoría es conocida como 'armonía preestablecida'.

significaría que es posible encontrar una realidad que compite en poder con la misma divinidad. Una constitución natural que Dios no podría alterar de ninguna manera y, en consecuencia, una barrera natural a su omnipotencia. De esta forma, Leibniz rechazaba las ideas de espacio y tiempo absolutos.

Leibniz comprendía el tiempo como la sucesión de acontecimientos o de fenómenos que ocurren en el cosmos, uno sigue a otro. Y, el espacio, como una relación entre objetos, entre la materia<sup>23</sup>. Es más, para este filósofo, si no hubiese materia alguna en el cosmos, no habría necesidad alguna de espacio. Pero Clarke se negaba aceptar este punto pues, en su visión, el tiempo y el espacio eran entidades reales y objetivas, que existían con independencia de los objetos que en él se encontrasen.

Durante el siglo XVIII, y en buena parte motivado por las discusiones precedentes, Kant se aventuró a exponer una visión diferente sobre estas entidades. En su conocida obra *Crítica a la razón pura*, Kant argumentó que el tiempo y el espacio son dos formas puras de intuición que la mente humana utiliza para organiza su experiencia. De esta forma, el tiempo y el espacio no son propiedades del mundo en sí mismas (absolutas, Newton) ni tampoco en relación a la materia o los acontecimientos (relativas, Leibniz) sino condiciones necesarias del conocimiento y la experiencia. En otras palabras, se trata de un conocimiento a priori, del que no podemos desprendernos y que utilizamos para percibir los fenómenos que se producen a nuestro alrededor y estructurarlos de manera lógica y racional. Además, Kant argumentó que estas formas puras de intuición no pueden ser probadas mediante la experiencia empírica, sino que, en tanto son a priori, han de ser entendidas como verdades fundamentales previas a todo conocimiento. El espacio y el tiempo en la formulación kantiana no derivan de la experiencia, sino que son condiciones necesarias para que esta sea posible:

*“El tiempo y el espacio no son cosas en sí mismas, ni tampoco son propiedades de las cosas en sí mismas, sino que son formas puras de la intuición sensible que reside en la mente humana [...] El espacio es una representación necesaria que subyace a todas las intuiciones externas. No podemos pensar en ningún objeto externo sin pensar en él al mismo tiempo como en algún lugar en el espacio” (Kant, 2013: A24 – B38)*

Pero, si hay un autor que destaque en tiempos contemporáneos, es, sin duda, Albert Einstein. Algunas de sus polémicas en torno al tiempo fueron muy sonadas en su momento y quedaron para la posteridad amplios registros de las mismas. Otras, aunque también importantes como el debate con Bergson, tuvieron menos repercusión. Como fuere, profundizar en el concepto de tiempo a través de estas discusiones dialécticas nos ayudará a enriquecer notablemente nuestro estudio. Aunque mantuvo correspondencia con físicos destacados de aquél entonces como Niels Bohr o Erwin Schrödinger sobre

---

<sup>23</sup> Leibniz es racionalista, al estilo de Descartes. Por esta razón, la influencia del pensador francés es notable en su filosofía.

la interpretación de la mecánica cuántica y su relación con la relatividad, serán las discusiones con el también físico alemán Max Born las que salten a la palestra.

Einstein siempre defendió que el tiempo no era una propiedad independiente del espacio, es decir, una realidad absoluta al estilo de Newton, sino que estaba íntimamente ligada tanto al espacio, como a la materia. Por tanto, la medición del tiempo dependía en buena medida del marco de referencia de cada observador. Esto lo hemos tratado con detalle en la sección acerca de la dilatación temporal por efecto de la velocidad o la gravedad. De hecho, el espacio y el tiempo conforman un todo indivisible conocido como tejido espaciotemporal. Bajo el paradigma de ese entramado indisoluble se gesta la teoría de la relatividad.

Born, por su parte, sostuvo que el tiempo era una propiedad objetiva y universal que existía independiente del espacio o la materia que en él se encontraba. Para Born, este argumento era un pilar indiscutible sobre la fundamentación de toda la naturaleza. Nuestra experiencia sensible no podía estar tan alejada de los parámetros de la física. El asunto derivó en un intento por comprender las implicaciones filosóficas que la relatividad acarreó para la articulación ontológica del ser humano, así como del propio universo. *“El tiempo es un concepto físico que se usa en la descripción del mundo físico, y que surge de la observación de la regularidad de los procesos naturales”* (Born, 1971)

Otra discusión interesante fue la que protagonizaron Einstein y el filósofo francés Henri Bergson. En la década de 1920, ambas figuras participaron en un curioso enfrentamiento dialéctico en el que cada uno representaba una forma diferente y opuesta de comprender la noción de tiempo. Bergson defendía que este era una realidad subjetiva, una duración continua que se experimentaba en la conciencia y la memoria (al estilo agustiniano), escribió: *"El tiempo es el modo de conocimiento que pertenece al mundo interior, al mundo de la vida, al mundo humano en el sentido más amplio de la palabra"* (Bergson, 1934). Bergson consideraba que el tiempo no podía reducirse a una dimensión matemática o física, sino que es una experiencia de la duración continua que manifestamos en la conciencia. Para Einstein, en cambio, el tiempo es una dimensión objetiva y relativa que depende del marco de referencia. Esto significa que el tiempo no es una realidad absoluta y universal (como, recordemos, creía Newton), sino que su medición depende del movimiento y la posición del observador.

En 1922, Bergson impartió una conferencia en la Sorbona titulada *La percepción del cambio*, en la que argumentaba que la teoría de la relatividad de Einstein no tenía en cuenta la experiencia subjetiva del tiempo y que el tiempo real no puede reducirse a una dimensión matemática. En respuesta, Einstein dio una conferencia en la misma universidad titulada *La teoría de la relatividad y el problema del espacio*, en la que argumentó que el tiempo descrito por la relatividad no contradice la experiencia

subjetiva del tiempo. “*Aunque persistente, la separación entre pasado, presente y futuro es solo una ilusión*” (Einstein, 1955) Aunque Bergson y Einstein nunca tuvieron un debate directo, sus diferencias filosóficas sobre el tiempo han sido consideradas como una confrontación entre la filosofía y la física. En última instancia, la teoría de la relatividad de Einstein se impuso como una de las teorías más influyentes de la física moderna, mientras que Bergson se mantuvo fiel a su idea de que el tiempo es una realidad subjetiva e intuitiva.

## 15. CONCLUSIONES

Al inicio de este ensayo, nos marcamos dos objetivos: primero, exponer, de una manera didáctica y sucinta, la forma en que comprendemos el tiempo desde los principios físicos y matemáticos de la cosmología contemporánea; y, segundo, abordar algunas problemáticas que giran sobre la concepción moderna de la temporalidad. Es necesario señalar que no resulta sencillo comprimir en unas pocas páginas todo lo que se ha escrito y debatido sobre el concepto del tiempo en las últimas décadas. Como mencionamos en las primeras líneas, este es uno de los más grandes retos del intelecto humano en general, y de la filosofía en particular, lo que ha originado una amplia literatura tanto científica como filosófica.

Algo que podemos apuntar en claro es la intrincada relación que la física y la matemática guardan en la construcción de modelos cosmológicos (como el del universo inflacionario). La física proporciona una base teórica sólida para comprender la estructura del universo, así como su evolución a gran escala. Las actuales herramientas matemáticas pueden describir con gran precisión la naturaleza de la materia y la energía en el cosmos, destacando especialmente la relatividad de Einstein o la mecánica cuántica. Gracias a ellas hemos podido ensanchar los límites de nuestro mundo e investigar más allá de nuestras fronteras galácticas.

El modelo cosmológico que manejamos hoy día también ofrece una explicación acerca de cómo empezó todo. Más allá de la especulación, el Big Bang queda refrendado por numerosas observaciones, experimentos e investigaciones en los últimos años. Tenemos un esquema completo del origen y evolución de nuestro universo, lo que nos permite imaginar qué ocurrirá en los próximos millones de años. Aquí entran en juego las nuevas teorías físicas y el ingenio humano. No obstante, la cosmología contemporánea solo conoce una parte del todo y nos queda por delante un camino muchísimo más largo que el que hemos recorrido hasta ahora.

El tiempo es esa fuente inagotable de curiosidad. Literatura, poesía, ciencia o filosofía se han acercado a él con la intención de desvelar su compleja arquitectura ontológica, obteniendo en la mayoría de los casos poca o ninguna respuesta. Sin embargo, cada una de esas aproximaciones intelectuales logra perfilar un poco más la verdad que queremos alcanzar. Ningún aporte es pequeño, mas, necesitamos de la profunda y sosegada reflexión para entender un asunto tan delicado. Nosotros hemos mencionado aquí algunos problemas clásicos de este tema como la flecha del tiempo o la concepción antropológica del mismo, pero también otros más originales como los viajes en el tiempo o la dilatación temporal que explica la relatividad. Con todo, esto es solo una pequeña parte de lo que cualquier persona interesada en la materia puede obtener buscando algo de información.

Finalizamos con un verso de uno de los poetas españoles más destacados del siglo XX:

*“El tiempo que hemos disfrutado es, de verdad, el tiempo que hemos vivido” (García Lorca, 2015)*

## 16. BIBLIOGRAFÍA

- Askin, F. (1968). *El problema del tiempo*. Ed: Pueblos Unidos.
- Bachelard, G. (1973). *La intuición del instante*. Ed: Siglo XX.
- Bachelard, G. (1978). *La dialéctica de la duración*. Ed: Villalar.
- Battaner, E. (2020). *Los físicos y Dios*. Ed: Los Libros de La Catarata.
- Barrow, J. D.; Tipler, F. J. (1986). *The Anthropic Cosmological Principle*. Ed: Oxford University Press.
- Bergson, H. (2000) *La mente y el movimiento*. Ed: Espasa.
- Blanco Laserna, D. (2012). *El espacio es una cuestión de tiempo*. Ed: RBA
- Boslough, J. (1986). *El universo de Stephen Hawking*. Ed: Salvat.
- Canales, J. (2020). *El físico y el filósofo*. Ed: Arpa.
- Coluccio, E. *Principio de Conservación de la Energía - Concepto y ejemplos*. (s. f.). Concepto:  
<https://concepto.de/principio-de-conservacion-de-la-energia/>
- Coomaraswamy, A. (1980) *El tiempo y la eternidad*. Ed: Taurus.
- Coveney, P.; & Highfield, R. (1992) *La flecha del tiempo*. Ed: Plaza y Janés,
- Cultura, F. Y. (2023, enero 16). Sentido antropológico del tiempo (I) - IFFD España. *IFFD España - Web oficial de IFFD España*. <https://www.iffd.es/sentido-antropologico-del-tiempo-i/>
- De La Fe, E. M. (2022, 16 diciembre). *Las leyes físicas tal y como las entendemos en realidad podrían no existir*. Elperiodicodeespana: <https://www.epe.es/es/tendencias-21/20221213/leyes-fisicas-entendemos-realidad-existir-79894495>
- De paz, María. (2011) *Thinking geometry: a matter of philosophy. The case of Helmholtz and Poincaré*. Pág. 107-123. CFCUL-Publidisa. CFCUL-Publidisa.
- DiSalle, R. (2008). *Understanding Space-Time: The Philosophical Development of Physics from Newton to Einstein*. Ed: Cambridge University Press.

- Einstein, A. (1905). Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la emisión y transformación de la luz. *Annalen der Physik*. Núm 17. Pág.: 132 - 133
- Einstein, A. (1905) Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento. *Annalen der Physik*. Núm: 17. Pág.: 891 - 892
- Einstein, A. (1905) ¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido energético? *Annalen der Physik*. Núm: 18. Pág.: 639 - 641
- Einstein, A. (2012). *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Ed: Alianza Editorial.
- Galileo, G. (2011) Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo: ptolemáico y copernicano. Ed: Alianza editorial.
- García Astrada, A. (1971) *Tiempo y eternidad*. Ed: Gredos.
- Guth, A. H. (2006). *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*. Ed: Vintage Books.
- Hawking, S. (1989). *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*. Ed: Bantam.
- Hawking, S. (2009). *La teoría del todo: El origen y el destino del universo*. Ed: Debolsillo.
- Hawking, S., & Mlodinow, L. (2019). *El gran diseño*. Ed: Planeta.
- Hughes, E. W., & Iachello, F. (2004). *In Memory of Vernon Willard Hughes: Proceedings of the Memorial Symposium in Honor of Vernon Willard Hughes*. Ed: Yale University. USA. Núm: 14-15 Novmber - 2004. World Scientific.
- Husserl, E. (1995) *Fenomenología del tiempo inmanente*. Ed: Alias.
- Leibniz, G. W. F., & Clarke, S. (Eds. Rada, E.) (1980). *La polémica Leibniz-Clarke*. Ed: Taurus.
- Marín Casanova, J. A. (2022). *Contenidos de humanismo para el siglo XXI*. Ed: Alianza.
- Mach, E. (2001). *Desarrollo histórico-crítico de la mecánica*. Ed: Espasa – Calpe.
- Mach, E. (2014). *Geometría y espacio*. Ed. Espasa – Calpe.
- Maxwell, J. C. (2011) *Una teoría dinámica del campo electromagnético*. Ed: Alianza
- Mediavilla, D. (2013, 16 enero). *¿Quién puso nombre al "Big Bang"?* La Razón.

<https://www.larazon.es/sociedad/ciencia/quien-puso-nombre-al-big-bang-ID720684/>

- Menares, G. P. (2014). *Wenumapu: astronomía y cosmología mapuche*. Ed: Ocho libros.
- Minkowsky, H. (1909) *Espacio y tiempo*. Revista de Física. 1909. Núm: - Pág: 18
- Newton, I. (1982). *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Ed: Alianza.
- Newton, I. (2020). *El sistema del mundo*. Ed: Alianza.
- North, J. D. (1990). *The Measure of the Universe: A History of Modern Cosmology*. Ed: Dover Publications.
- Nye, M. (Ed.). (2002). *The Cambridge History of Science, Vol. V (The Cambridge History of Science)*. Ed: Cambridge University Press. DOI:10.1017/CHOL9780521571999
- Rastrojo, J. B., & Marín-Casanova, J. A. (2018). *El pensamiento diario - La biografía filosófica en el aula universitaria*. Ed: ACCI (Asociación Cultural y Científica Iberoamericana).
- Rioja, A.; Ordóñez, J. (2010). *Teorías del universo. Volumen III*. Ed: Síntesis.
- Riveiro, A. (2015). *La teoría de la relatividad y los viajes en el tiempo (sin dolores de cabeza)*.  
Astrobitácora: <https://www.astrobitacora.com/la-teoria-de-la-relatividad-y-los-viajes-en-el-tiempo-sin-dolores-de-cabeza/>
- Rodríguez Valls, F. (2017). *Orígenes del hombre: la singularidad del ser humano*. Ed: Biblioteca nueva.
- Rosado Carmona, F. R. (2022) *El universo de Hubble: implicaciones filosóficas de la cosmología contemporánea*. Ed: -
- Rovelli, C. (2018). *El orden del tiempo*. Ed: Anagrama.
- Ruíz de Elvira, A. (2004). *Cien años de relatividad: los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*. Ed: Nivola.
- Penrose, R. (1991). *La nueva mente del emperador*. Ed: Mondadori.
- Pucelle, J. (1976). *El tiempo*. Ed: Ateneo.
- Sánchez Ron, J. M. (2014). *El mundo después de la revolución científica*. Ed: Pasado & Presente.
- Schopenhauer, A. (2007). *El mundo como voluntad y representación*. Ed: Mestas.
- Singh, J. (1974). *Ideas y teorías fundamentales de la cosmología moderna*. Ed: Alianza Editorial.

Torretti, R. (1999). *The Philosophy of Physics*. Ed: Cambridge University Press.

Toulmin, S. y Goodfield, J. (1965). *El redescubrimiento del tiempo*. Ed: Espasa.

Weinberg, S. (2016) *Los tres primeros minutos del universo*. Ed: Alianza.

Whitrow, G. J. (1990) *El tiempo en la historia*. Ed: Crítica.

## 6.1 BIBLIOGRAFÍA GRÁFICA

Figura 1: efecto por aceleración en un campo electromagnético [representación artística]. (2023)

[www.fisicalab.com](http://www.fisicalab.com)

Figura 2: representación artística de la curvatura espacio-tiempo clásica. (2023) [El Espacio](#)

[Curvo: Teoría de Relatividad y la Curvatura Espacial \(historiaybiografias.com\)](#)

Figura 3: representación artística de la curvatura espacio-tiempo contemporánea. (2021)

[www.aminoapps.com](http://www.aminoapps.com)

Figura 4: representación artística del efecto de la curvatura sobre la luz. (2023) [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

Figura 5: representación artística del Big Bang. (2023) [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

Figura 6: cronología del Big Bang. Desouza, D. (2016) [www.techaeris.com](http://www.techaeris.com)

Figura 7: calendario azteca [fotografía] Glines, J. (2017) [www.pbase.com](http://www.pbase.com)