

SOBRE EL ESPACIO-TIEMPO

Daniel Baldomir

Abstract

In this paper we show some of the space-time characteristics that we put forward as answers to questions concerning their properties: dependency of both concepts after the relativistic formalism, its physical composition not only as «synthetic apriori», what is the highest accuracy we may get to measure them, how, when and from what have they arisen; and finally, whether they have a privileged direction in the Universe.

«A consideration which is of the greatest importance in all philosophy, and in theology itself, is this: that there are no purely extrinsic denominations, because of the interconnection of things, and that it is not possible for two things to differ from one another in respect of place and time alone, but that it is always necessary that there shall be some other internal difference...Then, if place by itself does not make a change, it follows that there can be no change which is merely local. In general, place, position and quantity... are merely relations... To be in place seems, abstractly at any rate, to imply nothing but position. But in actuality, that which has a place must express place in itself; so that distance and the degree of distance involves also a degree of expressing in the thing itself a remote thing...» Leibniz <1>.

Introducción

Los conceptos de espacio y tiempo deben ser los más utilizados por el ser humano sin saber «exactamente» su contenido. ¿Quién no tiene un reloj o una cinta métrica? La mayoría sabrían usar estos instrumentos con toda precisión, pero muy pocos nos dirían qué es lo que miden. Quizá por eso sea difícil hacerles creer su no obviedad. Culturalmente son imprescindibles, ¿quién no pone una cinta? Cuando se hace esto se conviene en hacer coincidir el espacio y el tiempo de al menos dos sujetos. En consecuencia, son susceptibles de objetivación. Nuestro lenguaje o el mismo pensamiento, están impregnados profundamente por estos conceptos, e. g. las preposiciones no tendrían significado unívoco sin obedecer fielmente sus reglas. Esto se puede transformar en un enorme prejuicio para el físico cuando necesita analizar profundamente sobre el contenido de estos entes. Dejarme exponer, a manera de introducción, algunas preguntas que actualmente la Física tiene planteadas, para las cuales consiguió sólo respuesta (en algunos casos) muy recientemente, si pensamos desde cuando se vienen utilizando estos conceptos:

I. ¿Son el espacio y el tiempo independientes?

II. ¿De qué están hechos?

III. ¿Hasta qué precisión podemos medirlos?

IV. ¿Cómo surgieron? ¿de qué? y ¿cuándo?

V. ¿Existe una dirección del tiempo?

Creo que estas preguntas pueden levantar la curiosidad de los filósofos y aún la de cualquier persona que esté interesada por la relación entre el pensamiento y la realidad. Aún sin ser físico.

En consecuencia, este artículo lo voy a restringir a contestar estas preguntas del modo más sencillo posible, desde el punto de vista de la Física actual. Como veremos, algunas de estas preguntas y otras encadenadas con ellas no tienen una respuesta unívoca todavía y otras sólo la lograron en los últimos 20 años. Sin lugar a dudas esto debe tener sus consecuencias dentro del conocimiento de los humanistas. Quizás algunos físicos las consideren metafísicas y al revés, los filósofos, demasiado físicas. Espero que ninguno tenga razón. Lo cual permitirá evolucionar la Física.

I. ¿Son independientes el espacio y el tiempo?

Desde el principio de este siglo (1905), tenemos que contestar a esta pregunta que no $< 2 >$. Esto no sólo supone un gran avance para la Física, sino para la historia del pensamiento humano. Explicuemos esto un poco más detenidamente.

El siglo XVIII y casi todo el XIX aceptaron la física newtoniana sin discutir sus fundamentos. El logro de explicar el movimiento de los planetas con tanta exactitud y aún predecir la trayectoria de otros nuevos, le daba la credibilidad propia de ser la teoría definitiva para conocer las leyes fundamentales de la Naturaleza. Sin embargo, esto no era más que en apariencia. Pues la interacción electromagnética en realidad no seguía sus leyes fundamentales. Esto llevó a discusiones históricas entre Ampère (seguidor newtoniano) y Faraday que introdujo el concepto de campo. Es decir, este último no admitió que la interacción electromagnética entre fuentes no tuviese un mecanismo local para transmitirse. Para comprenderlo mejor digamos que Newton suponía que la Tierra notaba «instantáneamente» la presencia del Sol o viceversa. De modo que el concepto de campo en este contexto no juega ningún papel. Sin embargo, si seguimos a Faraday nos diría que el campo es el encargado de llevar la información de una fuente a la otra y, en consecuencia, necesita un tiempo para realizarlo. Esta discusión propició el buscar experimentos que dictaminasen en una u otra dirección. Finalmente, los dos americanos Michelson y Morley comprobaron que el «campo» tenía un significado propio. En realidad comprobaron algo más: el campo electromagnético se propagaba a una «velocidad absoluta» independientemente de cómo se moviese el observador que la midiese o la fuente que lo emitiese. Por lo tanto, el «campo electromagnético» al menos parecía tener una realidad propia.

Einstein en 1905 $< 2 >$ analizó este hecho y lo propuso como una ley universal. Esto transformó los conceptos de espacio y tiempo. Vemos que simultaneidad entre dos puntos depende ahora de la distancia a la que se encuentren. Lo revolucionario

de Einstein consiste en que dió a la interacción electromagnética prioridad sobre cualquier otra interacción. La velocidad de la luz (campo electromagnético) es una constante y no existe ninguna otra interacción o forma de llevar información física entre dos puntos que la supere. Esto permite suponer que la distancia entre dos puntos viene dada por:

$$dS^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (1)$$

siendo $\eta_{\mu\nu}$ una pseudométrica con signatura (+ - - -) o (- + + +).

Es decir, no cumple la propiedad de ser siempre positiva la distancia entre dos puntos. Según esta métrica (no profundizaremos en este artículo sus propiedades geométricas y topológicas), si queremos quedarnos con distancias positivas necesitaremos restringirnos a una zona del espacio, que llamaremos causal. Es decir, el efecto siempre se produce después de la causa y no al revés. E. g., en esta zona los padres siempre son más viejos que sus hijos, al revés ocurriría para la zona con distancia negativa. El tiempo no es más que una componente del continuo espacio-tiempo y no tiene un carácter absoluto como ocurrió para la mecánica newtoniana.

¿Por qué sobrevivió tanto tiempo la idea del tiempo como algo absoluto y separado del espacio?

Dejando a parte las connotaciones de carácter filosófico que lleva implícita la nueva geometría del espacio-tiempo, la física del siglo XIX era esencialmente estacionaria o estática. Es decir, la gravitación aparecía determinada por una ecuación de Poisson.

$$\nabla^2 \Phi = 4 \pi \rho \quad (2)$$

igualmente que la electrostática o la magnetostática. Y esta era la principal Física de laboratorio si exceptuamos la Óptica, que aunque desde Maxwell no era más que una parte del espectro electromagnético, sin embargo tenía sus métodos propios. Fue desde Hertz cuando se obtuvieron explícitamente y controlaron, tanto en el laboratorio como en la tecnología, las ondas electromagnéticas. En este caso las ecuaciones de Maxwell que traducían el pensamiento de Faraday a mediados del siglo XIX seguían las ecuaciones de ondas <3>:

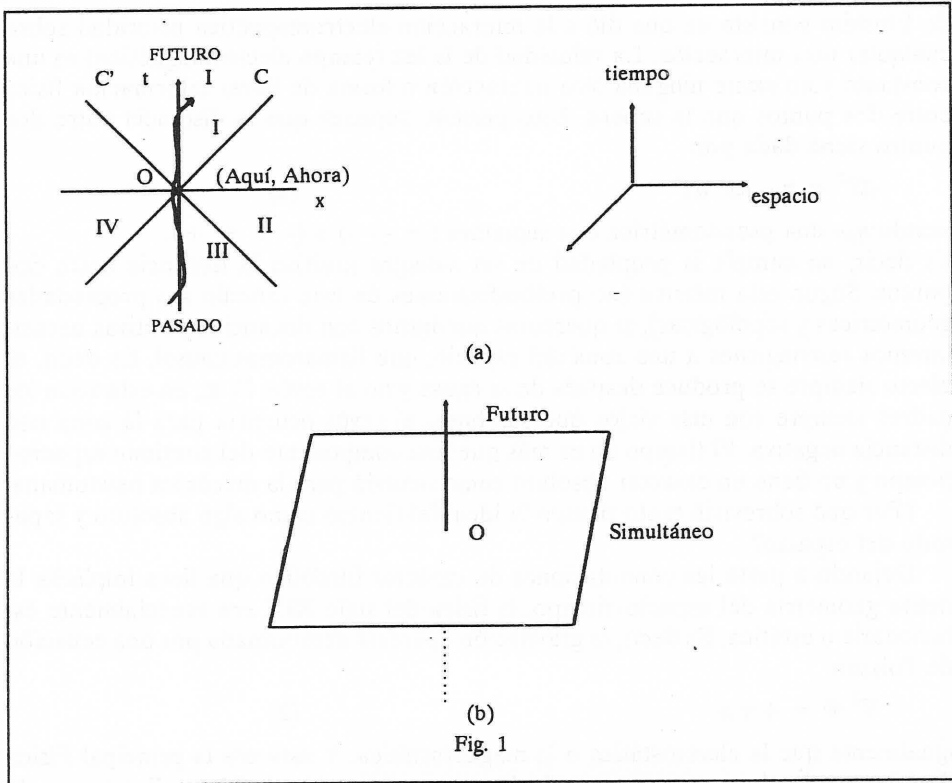
$$\square A_\mu = - J_\mu \quad (3)$$

donde en el operador \square va implícita una velocidad a diferencia del ∇^2 , que asume esta como infinita. Matemáticamente es aquí donde está contenido el concepto de espacio-tiempo cuando se admite que esta velocidad es independiente del observador y, en consecuencia, tiene un carácter «absoluto».

En la Fig. 1 represento el espacio-tiempo y el espacio y el tiempo tal como se admite antes de la relatividad.

Fig. 1 (a). Este es el caso de luz en dos dimensiones. C y C' son las velocidades de la luz. Las zonas II y IV son no causales, por lo tanto, se supone que no existen en la realidad. La I y III corresponden a la zona causal. La I es el futuro para el observador O y la III su pasado.

Fig. 1 (b). Como se ve en la parte (b) existe toda una superficie que tiene el mismo tiempo para cualquier punto, a diferencia del relativista que sólo tienen un punto O del aquí y ahora.



Hasta aquí Einstein lo que hizo fue poner las cosas bien. Se libró de los prejuicios newtonianos y verificó que la Física tenía una estructura menos evidente de lo que parecía, en cuanto a sus conceptos básicos de espacio-tiempo se refería. Pero fue en 1916 cuando introdujo algo completamente revolucionario y nuevo que permite contestar a la segunda pregunta.

II. ¿De qué está hecho el espacio-tiempo?

En el apartado anterior, yo dejé la aserción: «la velocidad de la luz es independiente del estado de movimiento del observador»; sin especificar el concepto de estado de movimiento al que me refería. En realidad, debíamos hablar del observador inercial (concepto heredado de la mecánica newtoniana), es decir, que no sufre aceleraciones, cuando dijésemos que relacionabamos otros observadores con él para ponerse de acuerdo en el espacio-tiempo con sus medidas físicas. Sin embargo, Einstein, también quiso prescindir de esta sutileza. Lo asombroso es que gracias a ello hizo que la interacción gravitatoria fuese la encargada de identificarse con el espacio-tiempo. Es decir, la gravedad produce el espacio-tiempo. En consecuencia, la interacción de Newton quedó modificada de tal modo que sirvió de

sustento para el espacio-tiempo en el cual se encuentran situadas todas las demás interacciones. ¿Cómo hizo esto? Hizo «equivalentes», localmente, un observador no inercial (acelerado) con un sistema gravitatorio. Es decir, un observador que está en el interior de un ascensor si cae libremente no observará que los cuerpos que lo rodean se atraigan tal como harían gravitatoriamente. Esto es muy importante entenderlo sólo como un principio local, sino no se cumpliría obviamente.

Fijémosnos que lo resumido aquí significa que la masa gravitatoria es absolutamente independiente de la composición química, u otras características del material. En consecuencia, todas las masas se comportarían de igual modo bajo el efecto de la gravedad. Era ya un hecho desde Galileo que las masas caían todas con la misma aceleración. En consecuencia, lo que hizo Einstein fue escoger una aceleración g , también como «absoluta» para un entorno del «espacio-tiempo dado», en el sentido de ser independiente del cuerpo que le pusiesen en frente.

Matemáticamente lo que buscó fue una geometría no euclídea que dependiese de la métrica e identificó el tensor:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R \quad (4)$$

contracción del de Riemann (hoy conocido como el tensor de Einstein), con el invariante energía-momento, del modo siguiente:

$$G_{\mu\nu} = 8 \pi G T_{\mu\nu} \quad (5)$$

donde G es la constante gravitatoria universal de Newton. Esta ecuación sigue teniendo hoy toda su riqueza, aunque una gran parte de físicos modernos está tratando de analizarlas para sustituirlas por otras que están más de acuerdo con las ecuaciones que nos contestan a la pregunta: ¿de qué están hechas las cosas?, que es la Mecánica Cuántica. Como veremos, Einstein precisamente trató de eludir esta pregunta y fundamentó en esta indeterminación sus cálculos. En consecuencia, creo que la respuesta tiene que llevar de nuevo implícitas contestaciones revolucionarias como a principios de siglo. Obviamente esta es una apreciación muy subjetiva y existen gran cantidad de físicos que refutarían tal aserción. Sintetizando, llegamos a la conclusión de que el espacio-tiempo estaba hecho de «energía-momento».

Por ejemplo, el pequeño príncipe de Saint Exupéry, viviendo en su asteroide, tendría un tiempo mucho más rápido que un observador que aguantase a vivir en el centro del Sol. El responsable está en que el Sol tiene asociada mucha más energía a su masa que el asteroide. Así, nuestro pequeño príncipe se transformaría mucho antes en rey, que el alienígena huésped del Sol (dado que tuviese sangre real alguna vez).

III. ¿Hasta qué precisión podemos medirlos?

Hasta ahora hemos olvidado la interacción de la luz con la materia. En general, de los campos con la materia. Este tema abrió a principios de este siglo la otra revolución de la física: la Mecánica Cuántica <4>.

Según esta teoría, el conocimiento del tiempo y del espacio está limitado. Es decir, el principio de indeterminación de Heisenberg nos dice que:

$$\begin{aligned} \Delta E \cdot \Delta t &\geq \hbar/2 & (c = 1) \\ \Delta p \cdot \Delta x &\geq \hbar/2 & (c = 1) \end{aligned} \quad (6)$$

la energía es la magnitud conjugada del tiempo. O sea, que si determinásemos exactamente el incremento del tiempo, obtendríamos un desconocimiento absoluto de la energía de la partícula o sistema que midiésemos. El orden de magnitud a lo que ocurre esto es del orden de la constante h de Planck partida por 4π . Igualmente ocurre para el espacio con respecto al momento que lleva la partícula o sistema. Dado que la constante h es del orden de 1.0545×10^{-34} Js, que corresponde a una acción muy pequeña significará que para partículas grandes o cuerpos macroscópicos su cinemática o dinámica no se altera por la imprecisión en su determinación para las variables espacio-tiempo. De hecho, los errores de medida tanto para las reglas o los relojes está muy por encima de cualquier cantidad que no se acerque a partículas muy fundamentales.

Desde el punto de vista de esta teoría, los campos no van a ser más que un promedio de partículas de interacción. Así para el campo electromagnético esta partícula es el fotón ν . Veáse un diagrama espacio-tiempo en la figura 2 donde comprobamos que la ley de Coulomb, en este caso entre dos electrones, se explica por el intercambio de una partícula que es el fotón ν , encargada de compartir energía y momento entre ambas.

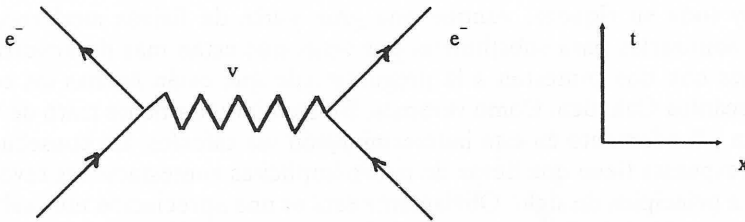


Fig. 2

Fig.2. Diagrama de espacio-tiempo para la interacción entre dos electrones. La repulsión entre ellos aparece como el intercambio de un fotón.

Para el fotón su energía y momento valen:

$$E = \hbar \cdot \omega; \vec{p} = E/c \quad (7)$$

Esto significa que si el fotón se aleja del orden

$$\Delta X \cong \hbar/p \quad (8)$$

no seremos capaces de detectarlo. En consecuencia, podemos suponer que a esta distancia viaja un fotón entre ambos electrones llevando la información del campo electromagnético a niveles microscópicos. El primero en comprobar experimentalmente este scattering entre fotones y electrones fue Compton en los primeros momentos históricos del nacimiento de la Mecánica Cuántica. Debemos observar que esta teoría distingue entre espacio y tiempo. De hecho la ecuación fundamental que rige la cinemática está regida por un operador hamiltoniano. En consecuencia,

para pegar esto con el tensor «energía-momento», que decíamos en los apartados anteriores que formaba el espacio-tiempo, tendríamos que indicar como cortar este tensor en sus proyecciones puramente espacial y temporal. Esto guarda complicaciones geométricas que, por desgracia, no siempre son solubles. Sólo se puede hacer esto cuando a la estructura del espacio-tiempo se puede añadir otra, la de un espacio de configuración asociado que tenga geometría simpléctica y sean completamente compatibles. Esta es una de las vías de investigación más serias en este momento para la cuantificación del espacio-tiempo y es conocido como el método de cuantificación canónico dado por Ashtekar y Geroch <5>. La idea básica consiste en tomar los estados del sistema a estudiar como descritos por la función de onda $\varphi(q)$ de las variables de configuración y después de aplicar las ecuaciones canónicas de Hamilton, determinar la evolución temporal $\varphi(q)$ mediante la ecuación de Schrödinger

$$\hat{H}\varphi = \partial/\partial t \varphi \quad (9)$$

Otro método, quizás más adecuado porque no necesita romper drásticamente el espacio-tiempo, es el de las integrales de camino, como es bien conocido por todos los físicos desde que Feynman lo introdujera en la Mecánica Cuántica. En este caso las ecuaciones de Einstein se pueden derivar de un principio variacional utilizando un método perturbativo. Para ello se toma como función de partición Z , la dada por la integral

$$Z = \int e^{iS[g_{\mu\nu}]} d\mu [g_{\mu\nu}] \quad (10)$$

donde S es la acción de la interacción gravitatoria y μ la medida de la integral. Ambas cantidades dependen de la métrica. En consecuencia, tenemos una integral sobre distintas métricas. Podemos suponer las dificultades que esto lleva implícito. Sin embargo, este método, aunque formalmente, se puede decir que fue hasta ahora el más exitoso entre los numerosos en cuantificar el espacio-tiempo. Pero debemos decir que no ha habido éxito. Todavía no se ha logrado nada convincente y posiblemente la raíz del problema esté en que sea necesario modificar algunos de nuestros conceptos fundamentales como son los del tiempo o del espacio. Es este un tema que actualmente cuenta con gran cantidad de sugerencias en la literatura. Pero pido disculpas, porque he llevado un poco lejos al lector y abusado de sus conocimientos necesarios para entender la gerga anteriormente usada. No importa, si le digo que no se preocupe, ya que lo único importante que necesita saber es que no se logró la cuantificación de la interacción gravitatoria y, por ende, del espacio-tiempo. Sin embargo, aunque mientras no se haga esto, huelga dedicar mucho tiempo a cuestiones como el nacimiento del Universo, etc., sin embargo podemos establecer cotas de conocimiento para medir el espacio y tiempo actualmente. Expresemos los conceptos más extremos para la determinación del espacio y del tiempo.

En la teoría de agujeros negros, es decir, singularidades el campo gravitatorio donde su energía almacenada tiende a infinito, se comprobó que la menor distancia que puede ser operacionalmente definida es la distancia de Planck, $l_p \cong 10^{-33}$ cms.

A esta distancia, una partícula con este radio, su longitud de onda λ de de Broglie-Compton asociada iguala la circunferencia de un agujero negro con la misma masa. O sea:

$$\frac{\kappa}{m.c} = l_{pl} \quad (11)$$

y como para un agujero negro la energía en reposo iguala a su energía potencial, entonces:

$$m.c^2 = G m^2 / l_{pl} \quad (12)$$

Esto nos lleva a definir el tiempo de Planck:

$$t_{pl} = \frac{l_{pl}}{c} \cong 10^{-43} s \quad (13)$$

y la masa de Planck dada directamente de (12) como:

$$m_{pl} = l / \sqrt{G} = 10^{19} GeV \quad (14)$$

donde G es, como ya digimos anteriormente, la constante universal de gravitación de Newton.

Estos son los límites actuales de nuestro conocimiento microscópico para el espacio y el tiempo más diminuto. Podríamos realizar interesantes sugerencias con la escala de estas magnitudes y el radio del protón, del Universo, etc. Pero para los objetivos del presente artículo nos daremos por satisfechos con indicar brevemente los límites actuales y como aún no se conoce su cuantificación definitiva del espacio-tiempo.

En consecuencia, todavía se acepta plenamente la teoría de Einstein de comienzos de siglo, como la buena para conocer el espacio-tiempo como un continuo que entra en serias dificultades al introducir el formalismo de la Mecánica Cuántica dentro de su estructura. Espero haber dejado entrever al lector parte de las contradicciones internas entre ambas teorías de tal modo que no se sienta demasiado impresionado por tal resultado.

IV. ¿De qué surgieron? ¿Cómo? y ¿Cuándo?

Hoy creemos tener respuesta a estas preguntas aunque desde luego no de un modo matizado, puesto que para contestarlas bien debíamos ser capaces de resolver la pregunta anterior a ellas. Y no pudimos hacerlo de un modo absolutamente seguro debido a que la interacción gravitatoria, todavía no se sabe ni se puede poner como una teoría cuántica.

Sin embargo, aún rudamente, podemos dar una contestación bastante razonable. Por ejemplo, podemos decir que no necesariamente surgieron de la nada. En consecuencia, no fue necesario un acto de creación externo al Universo mismo. Veamos como:

Si contraemos nuestro Universo hasta el instante con tiempo $t_{pl} \cong 10^{-43} s$, entonces el Universo se reduciría a una pequeñísima esfera de radio la longitud de Planck $l_{pl} \cong 10^{-33} cms$.

Y podríamos probar que a esta distancia hay un máximo de caos. En consecuencia, no podemos establecer relaciones causales entre los procesos físicos de un modo inmediato. ¡Las fluctuaciones pueden ser enormes! En consecuencia, el Universo y

su espacio-tiempo asociado surgieron como una fluctuación aleatoria en el tiempo de Planck.

Profundicemos un poco más en este punto. Si $\Delta t = t_{pl}$, el principio de incertidumbre (6), nos dice que la energía E_0 inicial del Universo tendrá un valor aleatorio escogido de una distribución normal de valor medio cero y desviación tipo

$$\Delta E = \sqrt{2} m_{pl}$$

Entonces nosotros podríamos esperar que si un accidente hiciese que tomase el valor E_0 , entonces la densidad de energía inicial ρ_0 sería del orden

$$\rho_0 \cong \pm \frac{m_{pl}}{l_{pl}^3} = \pm m^4_{pl} \quad (15)$$

Asumiendo un Universo vacío, esto significaría que la constante cosmológica Λ tendría un valor del orden

$$\Lambda \cong \pm 8 \pi G m^4_{pl} \Rightarrow G_{\mu\nu} = 0 \quad (16)$$

Suponiendo que también accidentalmente fuese positiva, entonces el Universo comenzaría a expandirse de un modo inflacionario de acuerdo a

$$L = e^{Ht} \quad (17)$$

siendo L la dimensión espacial alcanzada por el Universo y H la constante de Hubble, con valor

$$H = (\sqrt[3]{\Lambda})^{1/3} \quad (18)$$

Esta energía sería capaz de producir toda la materia que actualmente vemos en nuestro Universo, si nos atenemos a la densidad crítica admitida

$$\rho_c = 10^{-30} \text{ g cm}^{-3} \quad (19)$$

Pues tomando como radio del Universo 10 billones de años-luz, entonces se tendría como masa

$$m = \rho V = 10^{55} \text{ g} \quad (20)$$

que corresponde a la energía de 10^{88} eV. Entoces el Universo se debió expandir y curiosamente se paró al conseguir $10^{20} L_{pl} = 10^{-13}$ cms., que es el radio de un protón. No seguimos en esta línea, como ya adelantamos en el apartado anterior, nos llevaría fuera de las intenciones de este artículo.

Véase que fuimos capaces de contestar nuestras preguntas aunque para ello debimos suponer condiciones bien alejadas de nuestro sentido común, para las masas, energías y su espacio-tiempo asociado. Sin lugar a duda, a los filósofos espero que les atraiga especialmente el hecho de que a la escala del tiempo de Planck se consiga un máximo de caos y, por lo tanto, no haya secuencias causales para los procesos físicos implícitos.

¿Cuáles son las consecuencias lógicas de una teoría que parte de tal afirmación?

V. ¿Existe una dirección del tiempo?

Mirar las estrellas del firmamento es retroceder en el tiempo y ver nuestra

historia pasada. Este es un estimulante pensamiento que merece una atención especial y que guarda una relación directa con la respuesta a la pregunta que planteamos en este apartado.

Dado que la velocidad de luz es finita. El fotón que toca nuestra retina cuando miramos una estrella fue emitido en el pasado. La explosión de las bombas atómicas de la Segunda Guerra Mundial sobre el Japón emitieron gran cantidad de fotones, que posiblemente hoy estén llegando a un observatorio astronómico muy cercano a nuestro planeta. Podemos imaginar que dentro de muchos más años otros observatorios capten igualmente parte de estos fotones. En consecuencia, estarán hurgando en nuestro pasado y siendo parte de nuestra historia. Más paradójico todavía es que nosotros podríamos algún día observar, como en una película, el pasado de una civilización que ya no existiese.

De hecho, a principios de este siglo se comprobó más, que el Universo se expandía. Esta comprobación la hizo Hubble y representamos en la Fig. 3 esta expansión. Obviamente esto sugiere que hubo un inicio para el Universo como adelantamos en apartados anteriores. Curiosamente esto condujo a considerar el espacio tal como ya Leibniz (1) hiciera en el pasado y sólo considerando el pensamiento como herramienta (véase la anotación del inicio del artículo).

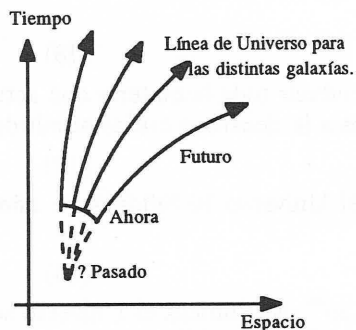


Fig. 3

Fig. 3. Observación de la expansión del Universo para un conjunto de Galaxias donde podemos ver su pasado, presente y futuro.

La curvatura de las líneas del Universo indica si va a estar en expansión siempre, o si alguna vez comenzará a contraerse. El principal parámetro que nos dilucida esto es la densidad crítica ρ_c que ya trabajamos anteriormente. Esta tiene la incertidumbre suficiente en su medida como para que aún no se sepa que tipo de Universo tenemos.

Sin embargo, la expansión universal parece estar relacionada con el flujo del tiempo en una única dirección. Es decir, podemos considerar el Universo como una clase de reloj fotográfico, el cual si nos muestra las galaxias más unidas implica un tiempo más temprano, que si están más separadas. Dado que la expansión es siguiendo una recta con pendiente una constante H , entonces tenemos cuantitativa-

mente el tiempo para cualquier instante dado en su evolución.

Otra dirección del tiempo es bien conocida por la Termodinámica. Esta nos dice que la entropía siempre evoluciona en el tiempo de tal modo que crece y tiende a un máximo. Si en un momento determinado el Universo se parase y se contrayese sería fácil probar que la dirección de la entropía también cambiaría. No es fácil demostrar una relación causal entre uno y otro proceso, pero lo que sí resulta inmediato es que ambos tiempos, termodinámico y cosmológico siguen la misma dirección.

La otra dirección del tiempo es la electromagnética. Las ecuaciones de Maxwell, que guían el electromagnetismo y que como vimos fueron las que obligaron a introducir el concepto de espacio-tiempo relativista, son simétricas con respecto a transformaciones temporales. Matemáticamente tenemos soluciones (Lienard-Wiechert para los potenciales) que tanto son avanzadas en el tiempo como retardadas. Sin embargo, las ondas avanzadas jamás fueron observadas en la naturaleza. Luego, parece como si también hubiese una elección de la dirección del tiempo para las ondas electromagnéticas. Ver la figura 4.

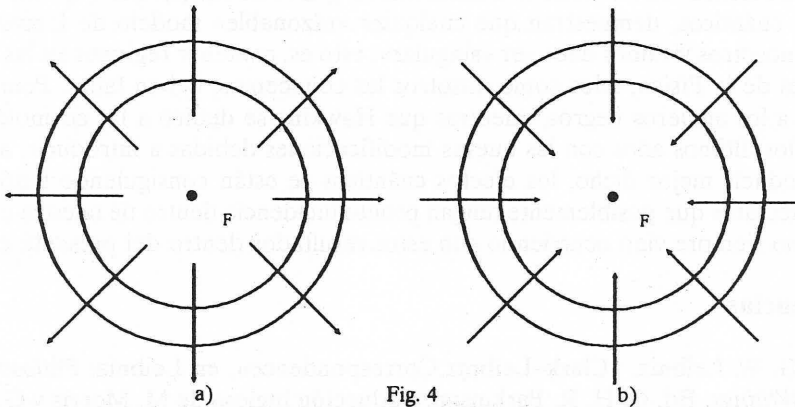


Fig. 4

Fig. 4. En el diagrama a) representamos los frentes de onda electromagnéticos retardados. En cambio en el b) representamos los avanzados. Estos últimos no existen. Como vemos coincidirían con el tiempo de contracción del Universo.

Wheeler y Feynman se preocuparon mucho de esta preferencia para las ondas electromagnéticas y de hecho crearon un modelo muy interesante donde volvía a surgir la interacción a distancia y no se necesitaban los campos como intermediarios físicos de la interacción.

Feynman, que fue uno de los principales artífices en la cuantificación de la interacción electromagnética, siempre se refirió a este problema con gran interés y se asombró que no tuviese ninguna aplicación tal hecho.

Pues bien, aquí utilizamos lo anteriormente dicho para afirmar que el tiempo tiene una dirección bien determinada y que está dada por la expansión del Universo, evolución de los estados termodinámicos de tal modo que se consiga el equilibrio a un máximo de entropía y, finalmente, que las ondas electromagnéticas sólo existen

las retardadas que están de acuerdo con las direcciones previamente mencionadas y sin embargo su sentido opuesto no se observa experimentalmente. Los astrónomos pioneros que trabajaron sobre este punto fueron Narlikar y Hoyle, dándole el nombre de «problema de la flecha del tiempo» para esta cuestión. Todavía falta una teoría que explique esta relación como causal (de hecho esta fue por algunos años la preocupación principal del autor de este artículo).

Conclusión

Podríamos seguir planteándonos preguntas tales como cuando es posible definir de un modo unívoco la causalidad para distintos modelos cosmológicos, etc. Lo cual estoy seguro que tendría interés para los filósofos, sobre todo si se compara con las paradojas obtenidas al introducir la visión cuántica. De todos modos, el lenguaje a utilizar tendría que ser bastante exacto y pienso que para un acercamiento a este tema es suficiente. El resultado fundamental de esta parte está sintetizado en el célebre teorema de las singularidades debidas a Hawking y Penrose a mediados de los años sesenta <6>. Estos teoremas son de gran interés, porque dejando aparte efectos cuánticos, demuestran que cualquier «razonable» modelo de Universo en el cual nosotros vivamos debe ser «singular»; esto es, contener regiones en las cuales las leyes de la Física, tales como nosotros las conocemos, deben fallar. Penrose se dedicó a los agujeros negros, mientras que Hawking se dedicó a las cosmológicas.

En los últimos años con las nuevas modificaciones debidas a introducir, a tratar de introducir mejor dicho, los efectos cuánticos se están consiguiendo fenómenos espectaculares que posiblemente tengan pronto incidencia dentro de nuestra cultura. Tal como siempre vino ocurriendo con estos resultados dentro del presente campo.

Referencias

- <1> G. W. Leibniz, «Clark–Leibniz Correspondence», en Leibniz: *Philosophical Writings*, Ed. G. H. R. Parkinson, traducción inglesa de M. Morris y G. H. R. Parkinson, Londres, Dent, 1973.
- <2> A. Einstein, *El significado de la Relatividad*, Planeta Agostini, 1985.
- <3> W. Berkson, *Las teorías de los campos de fuerza desde Faraday hasta Einstein*, Alianza Editorial, 1981.
- <4> T. S. Kuhn, *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912*, Alianza Universidad, 1980.
- <5> R. M. Wald, *General Relativity*, The University of Chicago, 1984.
- <6> S. W. Hawking and G. F. R. Ellis, *The Large Scale Structure of Space–Time*, Cambridge University Press, 1973.

Agradecimiento: Agradezco a José Barros su ayuda en el diseño de gráficas y tratamiento de texto.

Daniel BALDOMIR
Universidad de Santiago de Compostela