Reflexiones Temporales. Del Tiempo del Mito al Tiempo Matemático.

Héctor Rago A.
Grupo de Física Teórica
Centro de Astrofísica Teórica (CAT)
Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes
rago@ciens.ula.ve

*"Nada me interesa tanto como el problema del tiempo,
y sin embargo nada me preocupa tan poco.
Nunca pienso en él".*
Charles Lamb

1 El Tiempo Multifacético

"Las dos caras de Jano, que se ignoran"
Jorge Luis Borges

Creo que fue Borges quien advirtió que el misterio del tiempo es acaso el único misterio esencial. Su presencia impregna de una forma tan total las mitologías y religiones, las artes, y el lenguaje, que históricamente ha sido difícil disociarlo de la concepción del mundo que él mismo se encarga de forjar.

Hay demasiado 'tiempo' en las oposiciones dialécticas (¿recuerdan la palabra?) cambio/permanencia, mortalidad/inmortalidad, instante/eternidad, pasado/futuro, efímero/perpetuo, causa/efecto, azar/necesidad, caos/orden. Hay demasiado 'tiempo' en mitología y religión con su insistencia en un tiempo cíclico, circular, heredero sin duda de las pulsiones reiteradas del mundo natural, sus estaciones, mareas, movimientos de los astros y ciclos biológicos. O su promesa de una tierra sin tiempo, Nirvana para los hindúes, Moksha para los budistas y Eternidad para los cristianos; una de las maneras de exorcisar lo cotidiano y satisfacer anhelos de posteridad. Es a veces el creador, 'el tiempo, ese escultor' que bellamente nombró Margarite Yourcenar, otras veces el destructor, 'el tiempo que todo lo devora' escribió Ovidio.

Hay demasiado 'tiempo' en la música, "esa misteriosa forma de tiempo", desde Lucho Gatica pidiéndole al reloj que detenga el tiempo en sus manos, hasta piezas como *Mi comienzo es mi Final y mi Final es mi Comienzo*, del barroco francés, que suena igual tocada en un sentido que en el contrario, es decir invariante bajo reflexión temporal. Hay demasiado tiempo en la literatura en donde abundan las prefiguraciones alternativas al tiempo de nuestra experiencia, como 'El jardín de los senderos que se bifurcan', esa alegoría de un tiempo multidimensional, o el siempre críptico Ulises, retornando al instante donde comenzó.

Por todo esto, el tiempo entra tardíamente al mundo del pensamiento y siempre revestido de un ropaje que se empeña en ocultar su verdadero rostro.

Su inserción al mundo del pensamiento supone deslastrarlo de esa mítica sujeción al pasado; supone romper la oposición entre el tiempo circular del mito y el tiempo lineal de la ciencia, para descubrir al final que detrás de nuestra noción de tiempo psicológico se esconden agazapadas sutilezas más asombrosas que las que imaginaron los antiguos.

En este trabajo pretendemos resaltar algunos de los intentos de la ciencia por capturar y domesticar a la más elusiva de las bestias que nos hablan del universo. Nos toparemos con algunas de las metamorfosis en su transfiguración del tiempo mítico al tiempo matemático y nos pasearemos por algunas de las preguntas que se ha formulado la historia, acerca del problema inagotable del tiempo. Entre otras:

- La famosa pregunta de San Agustín; ¿qué es el tiempo? ¿Seguiremos respondiendo como él? Si nadie me lo pregunta, lo sé, si quiero explicarlo ya no lo sé.
- ¿Fluye realmente el tiempo? ¿Es válida la imagen heraclitana del tiempo como un río?
- ¿Tuvo un comienzo como cuentan los mitos de creación y como sugiere el big bang?
- ¿Tendrá un final como pretenden algunos modelos cosmológicos o finales locales en las singularidades de los agujeros negros?
- ¿Es continuo como nos parece percibirlo o esta continuidad es una elaboración 'cinematográfica' de nuestra mente?
- ¿Podemos alterar el flujo del tiempo, detenerlo o revertirlo y viajar al pasado, como un río con meandros, remansos y caños?
- ¿Cuál es el origen de las flechas del tiempo y en qué se parece el tiempo de nuestra experiencia al tiempo (o los tiempos) de las teorías físicas?

2 Brevísima Historia del Tiempo

"Todo tiempo pasado fue mejor"

No sabemos si el tiempo se extiende infinitamente hacia el pasado o si emergió hace unos quince millardos de años de acuerdo a las teorías cosmológicas en boga, tiempo asociado al inicio de la expansión del universo observable. En todo caso suponemos que definitivamente no fue el jueves 26 de octubre a las nueve de la mañana del año 4004 antes de Cristo, como concluyó de sus estudios bíblicos el arzobispo James Usher.

Durante la antigüedad clásica no hubo demasiado énfasis en el estudio del tiempo. La influencia de Platón con su énfasis en esencias atemporales e inmutables, y su mundo ideal de los arquetipos postulaban un tiempo que era apenas la imagen móvil de la eternidad, el tiempo verdadero. Para los griegos el tiempo estaba subordinado a lo permanente, era asunto más de poesía que de matemáticas. Por eso su física es fundamentalmente estática. Desarrollaron una elaborada geometría del espacio pero no una dinámica. Salvo en la música donde el ritmo impone una medida, no hay metricidad en la noción griega del tiempo. Incluso un pensador tan original como Heráclito para quien la esencia de las cosas está en el cambio, no suponía un orden progresivo de los eventos; la tensión entre opuestos lo llevaba a una concepción circular del tiempo.

Es tan solo durante la edad media gracias a la triple influencia de pensadores cristianos, a la disolución progresiva del dogma aristotélico y a la construcción de relojes precisos de manos de los artesanos en las incipientes ciudades, cuando comienza a emerger un entendimiento del tiempo que habría de ser 'científicamente aprovechable'. En efecto, a diferencia de las religiones asiáticas, la religión cristiana tiene una fuerte componente de linealidad en su manera de entender al tiempo: sólo una vez ocurrió la creación, la caída, la redención y la resurrección.

Por otra parte el desarrollo de la navegación exigía relojes cada vez más precisos para orientar las naves en altamar. Los hermosos y elaboradísimos relojes, mezcla de astrolabio, calendario, con modelos del Sol, la Luna y la Tierra, que además podían funcionar por años, causaron un fuerte impacto en la mente del hombre medioeval, comenzaron a fomentar una comprensión del tiempo desligada de las disposiciones naturales y disociada de los asuntos humanos. Este tiempo que fluye de acuerdo a los designios de un artífice, comienza a enraizar en el hombre medioeval, las ideas de homogeneidad, continuidad y metricidad que serían elaboradas con más rigor en la inminente revolución científica del XVII.

Galileo, por ejemplo, ya imaginaba lapsos particulares de tiempo como segmentos de una recta, aunque carecía de la idea global de tiempo. Hay quien afirma que Descartes eludió la construcción de una dinámica por poseer una noción poco adecuada de tiempo.

Isaac Barrow en sus Geometrical Lectures escribe:

> *El tiempo sólo tiene longitud y es similar en todas sus partes y puede ser mirado como constituido por la simple adición de instantes sucesivos o como el flujo continuo de un instante sobre una recta o sobre una línea circular*

A pesar de que aún hay vestigios de la idea de ciclicidad, es notable lo cerca que estaba de la idea útil para la física. Correspondería al otro Isaac, su alumno Newton, elaborar una concepción del tiempo (absoluto) haciendo así con el tiempo lo que los griegos habían hecho con el espacio. Su contribución es tan importante que le dedicaremos más adelante una sección. El gran contendor intelectual de Newton, Leibniz, urdió contra el tiempo absoluto newtoniano la postura de un tiempo relacional más ligado a los eventos del mundo físico y sus relaciones. Curiosamente la posición de Leibniz es cercana a la que habría de proponer la relatividad varios siglos después pero fue la concepción newtoniana la que impregnó la física porque venía acompañada de unas leyes exitosas.

A finales del XIX y comienzos del XX el tiempo newtoniano fue erosionado por dos flancos diferentes; el primero promovido por el descubrimiento de las leyes de la termodinámica y el segundo, por la relatividad. Las leyes de la termodinámica resaltaron una dirección en el sentido del tiempo, aquella señalada por el aumento del desorden o de la entropía, propiedad de la que carecía el tiempo newtoniano. Fue la transición del universo-reloj al universo-máquina de vapor.

Einstein por su lado mostró en 1905 cómo la existencia en la naturaleza de una velocidad máxima, la de la luz, significa la abolición de un tiempo único, universal y absoluto; y una década más tarde demostró cómo el flujo del tiempo se ve alterado por la gravitación, trayendo al concepto de tiempo de un status trascendente y absoluto, a uno más ligado al universo y sus avatares.

El establecimiento en la década de los 80 del paradigma del big bang, cada vez mejor sustentado observacionalmente, le brinda apoyo a la idea de un nacimiento del tiempo, pero a la vez la inclusión de nuevas teorías de la microfísica para acercarnos a ese origen pareciera haber generado una fase llamada inflacionaria, que de ser genérica como proponen algunos modelos conducirían a un multiverso, pleno de burbujas en expansión. Nuestro universo y su big bang sólo sería un episodio más de ese multiverso tal vez eterno.

3 El Tiempo de Newton.

"El tiempo absoluto, desdeñoso del placer
y del dolor, sólo transcurre"
Octavio Paz

Isaac Newton era un hombre precavido. Por eso en sus Principia, escribe:

> *No defino al tiempo porque es bien conocido de todos. Sólo debo señalar que el hombre común no concibe esta magnitud bajo ninguna otra noción que no sea la relación que mantiene con objetos sensibles, y de ello surgen ciertos prejuicios para cuya eliminación será conveniente hacer la distinción entre lo Absoluto y lo relativo; lo Verdadero y lo aparente, y lo Matemático y lo común. El tiempo Absoluto, Verdadero y Matemático, tomado por sí sólo, sin relación a ningún cuerpo, transcurre de un modo uniforme correspondiente a su propia naturaleza.*

Newton logra así deslastrar nuestra noción de tiempo, de elementos subjetivos, simplificarlo al punto de permitir un tratamiento matemático. Físicamente, Newton identifica al tiempo con la variable independiente de la mecánica: el tiempo transcurre y las cosas se mueven. Matemáticamente Newton identifica al tiempo absoluto con la recta real y a un instante con un número real. El tiempo newtoniano hereda así los atributos que los matemáticos le brindan a los números reales; una estructura diferenciable unidimensional, con una topología Hausdorff, metricidad o distancia entre dos instantes, infinito y no compacto.

Para Newton estas propiedades eran necesarias para legitimar un análisis local, poder hacer una disección en la anatomía del tiempo y considerar lapsos infinitesimales dt, para poder aplicar su cálculo de fluxiones [3]. Note lo sugestivo del lenguaje, el tiempo t es el fluente, el que fluye.

El sistema newtoniano tuvo tal éxito que afianzó tremendamente la noción de la existencia de leyes de la naturaleza entendidas como ecuaciones diferenciales de evolución en el tiempo. Además, el formidable éxito empírico llevó de la mano la legitimación de la metafísica del tiempo, el tiempo absoluto como el sensorium de Dios. Más aún, la predictibilidad y su alter ego, el determinismo absoluto (laplaciano) se arraigó profundamente en la estructura de la física: la condición o el estado de un sistema en un determinado instante permite, al menos en principio, conocerlo (ecuaciones de evolución mediante) en cualquier instante posterior o anterior. La diferencia entre el hombre y una inteligencia superior capaz de discernir todos los eventos pasados y futuros del universo, es sólo cuestión de grado.

Paradójicamente, el triunfo del sistema newtoniano despoja al universo de la necesidad del tiempo. Si tanto el futuro como el pasado están contenidos en las ecuaciones de un sistema, podemos sencillamente prescindir de la noción de tiempo.

En el corazón mismo del sistema newtoniano está la idea de que el lapso transcurrido entre dos eventos, tiene el mismo valor para todos los observadores. En este sentido el tiempo newtoniano es absoluto: el ritmo de cualquier reloj mide el flujo de un tiempo trascendente y único.

4 El Tiempo de Einstein.

"Mi tiempo no es tu tiempo,
tu espacio no es mi espacio"

El sistema de Newton es simple, elegante, coherente y.... falso; o quitándole efectismo a las palabras, no falso pero no es toda la verdad. Ciertamente, el sistema newtoniano supone que hay velocidades de propagación infinitas. Pero el mundo no funciona así, hay una velocidad máxima, insuperable y cuya violación significa infringir no las leyes del tránsito sino las leyes de la naturaleza.

Einstein advirtió con claridad en 1905 que este hecho incontrovertible conduce a una revisión del concepto de tiempo según Newton. En particular, el ritmo en que fluye el tiempo (atestiguado por un reloj de cualquier tipo, de cuerda, digital, biológico ...) en un sistema que se mueva respecto de mi sistema, es más lento, tanto más lento cuanto más rápido sea su movimiento. Esto lleva a que cada observador use su propio tiempo (que en física se llama tiempo propio) pero que no coincide con el de los demás en movimiento relativo.

La razón por la cual no percibimos los efectos del retraso de relojes en movimiento, es que estos efectos son demasiado pequeños para las velocidades familiares. Nuestro cerebro ha sido (y es) moldeado durante milenios adaptándolo a ciertas condiciones para el desarrollo de la vida. Es natural que nuestros sentidos y nuestra intuición reflejen esas condiciones. Al transgredirlas, el mundo nos luce extraño, poco intuitivo paradójico y hasta contradictorio. La naturaleza puede ser más sutil que nuestros sentidos, pero las leyes que con esfuerzo descubrimos (¿o inventamos?) pueden explicar esas sutilezas. Si al hacerlo resultan "poco intuitivas", mala suerte para nuestra intuición. Ellas se deben al mundo físico, no a nosotros.

Una de las consecuencias del retraso del ritmo del tiempo en sistemas en movimiento es la llamada "paradoja de los gemelos". Uno de los mellizos viaja en una nave espacial al 80% de la velocidad de la luz, digamos, mientras que el otro permanece en la Tierra. Diez años después, medidos en la Tierra, emprende el regreso durante diez años más. Al regresar encuentra que su hermano y todo en la Tierra han envejecido 20 años, mientras que él, apenas 12. Este resultado podrá parecer extraño, pero no es contradictorio. Lo único paradójico es que a casi un siglo de la venerable relatividad, esto siga considerándose una paradoja. Es un efecto real. Extraño pero real. Tan real que ha sido constatado experimentalmente. No con dos mellizos sino con dos relojes idénticos (relojes hechos con masers de hidrógeno, muy precisos); uno en tierra y el otro viajando en un jet comercial (la NASA no quiso prestar sus aviones). El hoy ya famoso experimento [Hafele-Keating] confirmó plenamente la predicción de la relatividad. Moraleja: viaja y te conservarás joven (tres billonésimas de segundo viajando en jet toda una vida).

Sin embargo es en la relatividad general, la teoría de la gravitación de Einstein, en 1915, la que habría de introducir los cambios más sutiles, más profundos y más difíciles de digerir, en la concepción del tiempo, situándolo cada vez más en medio del mundo de los fenómenos físicos y menos en el pedestal de lo trascendente.

La gravitación es la curvatura del espacio y el tiempo producida por la materia y la energía. El término 'curvatura del tiempo' es una metáfora para aludir a la alteración del ritmo que sufren los relojes en presencia de campos gravitacionales. Esta 'flexibilidad del tiempo' aparte de estar muy bien corroborada por las observaciones [Vessot y Levine] abre sugestivas e insospechadas posibilidades a la emergencia o a la desaparición del tiempo. Consideremos estas posibilidades.

5 Huecos Negros o la Desaparición del Tiempo.

"Reloj detén tu camino
haz esta noche perpetua..."
Lucho Gatica

Hay circunstancias en las que la gravedad puede ser una fuerza indetenible y ocasionar un colapso total de la materia: la atracción fatal. La relatividad clásica afirma que la materia se ve obligada a sucumbir en una singularidad rodeada por una superficie imaginaria llamada horizonte. Lo que entra al horizonte no puede salir, ni siquiera la luz. Es un agujero negro. El ritmo de un reloj en las cercanías del horizonte está tremendamente enlentecido respecto de el de otro reloj colocado a salvo lejos de él. Al aproximarse al horizonte, el lapso entre un tic y el tac siguiente va aumentando sin límite. En el horizonte el tiempo se ha detenido, juzgado por nosotros, observadores externos. No así para el audaz explorador que cruce el horizonte. Su tiempo propio será el de siempre. Sin embargo, adentro del horizonte, su trayectoria necesariamente apuntará a la singularidad, de suerte (mala) que el parámetro que mide su tiempo no podrá ser prolongado indefinidamente: aún su tiempo propio tiene un final abrupto en la singularidad.

6 El Big Bang o la Aparición del Tiempo.

"Un tiempo para nacer, un tiempo para morir"
Eclesiastés

Aunque la relatividad supone un tiempo privado para cada observador y reglas claras para relacionar mi tiempo con tu tiempo, hay situaciones en las que es posible definir un tiempo global. En un universo aproximadamente uniforme (y el nuestro lo es en muy buena medida y sobre todo lo fue), existe un tiempo cósmico, el mismo para todos los observadores representados por las galaxias en expansión. Las ecuaciones de la gravitación conducen a que este tiempo cósmico no se puede prolongar indefinidamente hacia el pasado, porque nos topamos con curvaturas infinitas, temperaturas infinitas, presiones infinitas, densidades infinitas: de nuevo la temible singularidad que sugiere esta vez la emergencia del tiempo. Tiempos anteriores a este instante (convencionalmente designado como t=0) sencillamente no existen, es como preguntarse cuál es la dirección norte, estando en el Polo Norte. San Agustín, para evitar la pregunta de qué hacía Dios antes de crear al universo suponía que universo y tiempo fueron creados simultáneamente; fue una creación del tiempo y no en el tiempo. La explicación de los cosmólogos no es demasiado diferente.

A pesar de que las evidencias actuales sugieren que la expansión de nuestro universo continuará indefinidamente, una posibilidad es que eventualmente cese la expansión y comience a contraerse hasta que ocurra de nuevo una singularidad donde el tiempo deje de existir, pero no localmente como en el caso de las singularidades de los agujeros negros, sino globalmente, para todos los observadores. Shakespeare tendría razón: *"y el tiempo que lleva un registro de todo el universo, se detendrá"*. De ser así (no sabemos si nuestro universo colapsará) habrá un máximo lapso del cual tenga sentido hablar, el lapso comprendido entre el big bang y el big crunch. En caso contrario, el universo se expandirá indefinidamente, el tiempo se extenderá por toda una eternidad, y recordemos que Woody Allen profetizó que la eternidad es larga, sobre todo al final.

Es importante enfatizar que estas singularidades no son un artefacto de la simetría precisa impuesta, ni del uso de un sistema de coordenadas inapropiado. Como lo demuestran los teoremas debidos a Penrose, Ellis, Hawking, Geroch y otros, en los años 60, las singularidades en relatividad general son genéricas y no excepcionales.

7 ¿Viajes en el Tiempo?

"El problema no es viajar, sino
tener boleto de ida y vuelta"

Las propiedades elásticas del tiempo han abierto una ola de especulaciones científicas (que las hay) acerca de las posibilidades de viajes en el tiempo.

La literatura y el cine han sido pródigos en figuraciones e imaginaciones al respecto. Las *Memorias del 2.500* de L. Mercier (1771), *Un Yanki en la corte del Rey Arturo*, de Mark Twain (1880) o la famosa *Máquina del tiempo* de H. G. Wells (1895), *Regreso al Futuro, Terminator* y *Blade Runner* son algunos ejemplos.

En realidad hay muchas formas de viajar en el tiempo. Siempre viajamos a nuestro propio futuro, lo difícil es no hacerlo. Podemos viajar también al futuro de los demás, como el mellizo de la 'paradoja'. Pero más interesantes son las posibilidades de viajar al pasado, o dicho técnicamente, siguiendo una curva tipo tiempo cerrada. En 1949 el famoso lógico Kurt Gödel consiguió una solución de las ecuaciones de la gravitación de Einstein que representa un modelo de universo con curvas tipo tiempo cerradas. Es cierto que el modelo no se parece a nuestro universo real, es un modelo de un universo en rotación, mientras que las observaciones indican que nuestro universo no rota, pero no está claro si el universo de Gödel es una patología curiosa de las ecuaciones de Einstein o pueden existir curvas tipo tiempo cerradas en modelos más realistas. Otros investigadores han usado soluciones matemáticas tipo agujeros negros con miras a obtener máquinas del tiempo. Sin embargo, hay detrás de todo esto una contradicción insuperable en la posibilidad de reencontrarnos con nuestro propio pasado. Una de las maneras de mostrarla es a través de la llamada paradoja de la información. Aprendo el teorema de Pitágoras leyendo un libro de Pitágoras. Luego viajo al pasado y le enseño el teorema, antes de que a él se le ocurriese. ¿De dónde provino la información? Pitágoras me la enseñó a mí, y yo se la enseñé a él! Otra manera es el delirio lógico (además de ético) que aparece si viajo al pasado y asesino a mi abuela. ¿Puede el tiempo siempre bifurcante de Borges formalizado en la interpretación de muchos mundos de la mecánica cuántica [Everett] acudir a salvar la lógica? No lo creemos.

Si los viajes al pasado son posibles ¿porqué no estamos abarrotados de turistas del futuro dispuestos a presenciar los grandes acontecimientos históricos como la Crucifixión y la caída del muro de Berlín?

Muchos físicos sospechan que debe existir un principio fundamental que prohíba tales exhabruptos, pero hasta ahora no sabemos cuál es.

8 El Discreto Encanto del Tiempo.

"Este asunto debe ser considerado con mucha discreción... "
Trevis Knight

Unos párrafos más arriba señalamos que si el universo recolapsa, existe un lapso máximo. Podemos formularnos la pregunta siguiente, ¿existe un tiempo mínimo menos del cual no tenga sentido teórico hablar? En otras palabras, ¿existe una unidad básica de tiempo, un quantum temporal? ¿Es el tiempo discontinuo y nuestra mente al percibirlo lo elabora y completa produciendo la sensación de continuidad de una manera similar a como completamos los 24 fotogramas por segundo del cine?

De ser así, sería la continuación natural de un proceso que arranca con las prefiguraciones de los atomistas griegos y que en las primeras décadas del siglo

XX toman forma científica a través de la teoría cuántica de la materia; sigue con la luz, descrita por Maxwell como un campo continuo, para luego dar paso al concepto de fotón, o quantum de radiación electromagnética, descrito con propiedad con la electrodinámica cuántica.

Como siempre, la imaginación voló antes que la ciencia. Ya en el siglo III A.C. una secta budista, los seuntankritas, concebían un tiempo constituido por entidades discretas. No falta quien diga que las famosas paradojas de Zenón fueron formuladas para conjurar la discretitud del tiempo. En el siglo XII el erudito judío Moses Maimónides, en su *"Guía para el Perplejo"* escribió:

> *Una hora está dividida en sesenta minutos, éstos en sesenta segundos y así sucesivamente. Después de diez o más divisiones se obtienen unos elementos de tiempo que no son susceptibles de fraccionarse y son efectivamente indivisibles.*

Si la gravedad determina las propiedades del espacio y del tiempo y la gravedad debe ser cuantizada, la consideración del tiempo como una variable discreta (también del espacio), es ineludible; en otros términos, la relatividad y la cuántica nos dejan como moraleja que vivimos en un tiempo y un espacio cuántico, pero no sabemos qué significa exactamente eso porque no tenemos a disposición una teoría cuántica de la gravitación. La teoría cuántica de campos supone que no existe gravedad (G=0) y es una teoría de resultados asombrosos y sin reclamos experimentales importantes. La relatividad general, por su parte, supone que no existe cuantización (h=0), y también es impecable en su ámbito. Es el matrimonio entre ambas, tantas veces decretado y nunca consumado, lo que culminaría la revolución comenzada con la relatividad general y la teoría cuántica de campos. El caso es que además existen situaciones físicas donde la presunta teoría es imprescindible: en las cercanías del big bang o en las singularidades en los agujeros negros. Existen maneras de saber cuáles escalas de tiempo y espacio son relevantes para la gravedad cuántica. El tiempo resultante, llamado tiempo de Planck es aproximadamente 10^{-42} segundos y no tiene sentido teórico (experimental ni soñarlo) hablar de tiempos menores que el tiempo de Planck.

Si la relatividad nos enseña que las masas determinan el flujo del tiempo, y la cuántica nos enseña que no podemos precisar con certidumbre las posiciones de las masas, comprenderemos que el tiempo a nivel cuántico puede ser fluctuante, con cambios en su topología y tal vez discreto. Curiosamente, en los atisbos de teorías cuánticas de la gravedad, la noción de tiempo en algún sentido desaparece de la descripción (esto es una consecuencia de la invariancia de la teoría bajo difeomorfismos), y es posible que en los más fundamentales niveles debamos prescindir de él y comprender cómo emerge clásicamente de ese tiempo sin tiempo, la noción que usan las teorías a más bajas energías. Pero sólo una teoría cuántica de la gravedad, nos lo dirá.

9 Las Flechas del Tiempo.

"Quien mira un reloj de arena
ve la disolución de un imperio"
Jorge Luis Borges

Nuestro conocimiento de la realidad se apoya en percepciones 'directas' de objetos, del espacio ... y elaboraciones subjetivas como ideas, sentimientos, deducciones. Observemos lo difícil que es en esta simplificación, ubicar al tiempo. Nuestra conciencia percibe al tiempo a través de una escisión de la realidad en un pasado ya inexorable, inmutable y definitivo (algunos afirman que sólo los historiadores pueden modificarlo) y un futuro incierto, el reino de lo potencial y en principio modificable. La evanescente memoria recuerda el pasado mientras que la imaginación puede anticipar el futuro inmediato. En el pasado situamos las causas y en el futuro los efectos. Entre ambos, el tenue presente detectado a través de los sentidos. Esto nos sume en una sensación de transcurrir, de movernos del pasado al futuro con una brevísima parada en el limbo del presente.

Uno de los aspectos más notables en las nociones de tiempo que han usado las teorías de la física, es lo poco que se parecen a esta intuición ordinaria que tenemos del tiempo. En 1928 el gran astrofísico Sir Arthur Eddington escribió:

> *Lo más resaltante del tiempo es que fluye, aspecto que suele ser desdeñado por los físicos. Usaré la frase 'flecha del tiempo' para referirme a esta propiedad de una sola vía.*

En efecto, los físicos usan ecuaciones que describen aspectos profundos de la estructura del mundo material. Estas ecuaciones 'no se dan cuenta' de la manera como fluye el tiempo, si del pasado al futuro o en dirección contraria. Dicho en otras palabras, las leyes fundamentales de la física con las que entendemos e interpretamos a la naturaleza en sus más hondos niveles, no tienen una direccionalidad temporal, o en lenguaje técnico, son invariantes bajo la reflexión temporal t por − t. Una consecuencia de esta característica es que si las leyes de la física permiten una determinada secuencia de eventos, entonces permiten también la secuencia inversa, con la película pasada del final hacia el comienzo.

Esto contrasta visiblemente con la observación del mundo macroscópico donde la irreversibilidad es la norma. Al fin y al cabo, el tiempo pasa y nos vamos poniendo viejos, si le creemos a Milanés. Al fin y al cabo no vemos vasos rotos recomponiéndose espontáneamente, ni el humo convergiendo a una colilla de que se transformará en cigarro entero. Tan solo en el cine mudo y para producir risa por lo absurdo de las situaciones.

Los físicos han considerado diversas flechas del tiempo:

- La flecha psicológica, determinada por la manera en que experimentamos el tiempo.

- La termodinámica, dos sistemas con temperaturas diferentes y en contacto igualan sus temperaturas.
- La radiativa, las ondas (sonoras, luminosas, de radio...) brotan de la fuente, nunca convergen a ella.
- La gravitacional, evidenciada en los procesos de formación de estructuras y en la existencia de horizontes en los agujeros negros, en los que entran pero no brotan partículas o radiación.
- La cosmológica, definida por la expansión del universo.

Es precisamente a este aspecto dual, de un mundo controlado por leyes fundamentales 'atemporales' pero que manifiesta una flecha del tiempo, al que aludía Einstein cuando afirmaba que el "el tiempo es una ilusión, aunque una ilusión persistente".

La pregunta que se impone, es ¿Cómo conciliar la existencia de leyes simétricas con flechas del tiempo? ¿De qué manera las ecuaciones invariantes pueden conducir a un mundo con una clara dirección temporal?

Esta pregunta, en una época conocida como la paradoja de Loschmidt, ha sido considerada una y otra vez por generaciones de físicos, y algunos opinan que aún no tiene una respuesta decorosa.

Una posibilidad esbozada por Ludwig Boltzmann y luego elaborada por Hans Reichenbach, John Barrow, Roger Penrose y otros, consiste en advertir que el mundo que atestiguamos no son las leyes de la naturaleza, son sus resultados, sus productos, o sus soluciones; y en las soluciones interviene la ley pero además de eso intervienen las Condiciones Iniciales. Las leyes están vinculadas al aspecto invariante de la realidad, las condiciones iniciales se refieren a las particularidades eventuales de un sistema concreto. Sucede que hay condiciones iniciales más probables que otras. A un conjunto de condiciones iniciales improbable está asociada una idea de orden y las cuantificamos con un valor pequeño de una magnitud llamada entropía. Un gas cuyas moléculas fueron confinadas a un rincón del recipiente está representado por unas condiciones iniciales de baja entropía. Cuando el sistema evoluciona lo hará aumentando la entropía, porque habrá un mayor número de configuraciones desordenadas que ordenadas. Aparece una flecha del tiempo (termodinámica), hasta cuando la entropía sea máxima, la temperatura (y otras cantidades macroscópicas) sea uniforme y se haya alcanzado el equilibrio. La flecha del tiempo desaparece. En palabras de Ilya Prigogine,

> *Sólo cuando un sistema se comporta de forma suficientemente azarosa, la diferencia entre pasado y futuro y por tanto la irreversibilidad, entran en la descripción. La flecha del tiempo es una manifestación de que el futuro no está dado y que como el poeta francés Paul Valéry enfatizó, el tiempo es una construcción.*

El problema de porqué el universo posee una flecha del tiempo permitiendo así procesos de no-equilibrio como la vida, remite entonces a las condiciones iniciales, al big bang. En los primeros instantes el universo debió poseer una bajísima entropía, para que ahora, 15 millardos de años después, aún se esté desordenando. Curiosamente, los cosmólogos hacen los cálculos de las reacciones que ocurrieron en el temprano universo suponiendo equilibrio termodinámico entre la materia y la radiación (el espectacular espectro planckiano de la radiación cósmica de microondas detectado por el COBE (Cosmic Background Explorer) en 1992, confirma la validez de esta suposición), ¿cómo pudo ser un big bang ordenado si tenía el máximo de entropía? La respuesta está en la entropía de la gravedad. La gravitación tiene un comportamiento entrópico malévolo. Cuando la materia está repartida homogéneamente la entropía gravitatoria es nula, a medida que la gravedad forma estructuras ordenadas (estrellas, galaxias), aumenta. Un hueco negro (máximo de orden para la materia) es la configuración de mayor entropía gravitatoria, para una masa dada. El problema es que los físicos no tienen una expresión unánime para la entropía asociada al campo gravitacional.

De nuevo, las condiciones iniciales exigen una teoría cuántica del universo para el régimen prevalente durante el tiempo de Planck y poder acercarnos así al big bang. Tal vez unas únicas condiciones de contorno naturales, expliquen el hecho desconcertante de tener un universo excepcionalmente ordenado en sus primeros instantes.

Otros autores han especulado acerca de la existencia de un megauniverso, o multiuniverso, formado por universos múltiples, en constante aparición. Cada uno de ellos con valores diferentes de los parámetros físicos y diferentes condiciones iniciales. Sólo un subconjunto de ellos tendrá las propiedades aptas para el desarrollo de una flecha del tiempo y crear condiciones hospitalarias para el desarrollo de la vida. El nuestro pertenecería a este conjunto. Sin embargo, este tipo de razonamiento (antrópico) no ha conducido a explicaciones mejores ni más profundas acerca de las características de nuestro universo.

10 A Modo de Conclusión.

"que me importa
que todo en la vida
tenga su final"
Bolero

Hemos revisado a vuelo de pájaro algunos de los principales puntos de giro en la transformación del tiempo mítico al tiempo matemático. Hemos visto que los atributos diversos que diversas partes de la física le exigen al tiempo, revelan las sutilezas de una noción compleja, pero que al final entrega sus intimidades y sus secretos.

La palabra tiempo no vino de los cielos sino de la boca de los hombres, dijo alguien para enfatizar el carácter de construcción (¿cultural?) implícito en nuestras concepciones del tiempo. Esto nos lleva a preguntarnos si nuestras ideas actuales no lucirán en el futuro tan ingenuas como hoy nos lucen las de los antiguos mitos. Creemos que no. A pesar de la manera que la ciencia tiene de revisarse a sí misma, suele hacer afirmaciones que a diferencia de los diamantes, son para siempre, porque hablan de una propiedad objetiva de la fábrica de la realidad. Al fin y al cabo, el perímetro de la Tierra sigue siendo el que Eratóstenes predijo usando precarias observaciones y algunas matemáticas elementales; la simultaneidad será relativa y la luz seguirá curvándose en los campos gravitacionales.

Obviamente requerimos de teorías más sofisticadas si queremos entender algunos de los más escondidos secretos del tiempo, pero el esfuerzo valdrá la pena porque creo que fue Borges quien advirtió que el misterio del tiempo es acaso el único misterio esencial.

Referencias y Lecturas Sugeridas

[1] Barrow, John *The world within the World.* Oxford University Press, 1988.

[2] Davies, P. *About Time.* Simon & Schuster, 1995.

[3] Domingo, C. *Newton y las Matemáticas,* en Newton, edición Universidad de Los Andes, 1996.

[4] Everett, H. *Relative State Formulation of Quantum Mechanics.* Ed. Wheeler, Zurek, Princeton University Press, 1983.

[5] Hafele y Keating *Around the world, Atomic Clocks.* Science, Vol. 177, pp. 166, 1972.

[6] Penrose, R. *The Emperor's New Mind.* Oxford University Press, 1989.

[7] Prigogine, I. *¿Tan solo una Ilusión?* Tusquets Editores, 1988

[8] Thorne, K. *Black Holes and Time Warps.* Norton, 1995.

[9] Vessot, R. y Levine, M. *General Relativity and Gravitation.* Vol. 10, pp. 181, 1979.