

*NOSOTROS, EL UNIVERSO  
Y LOS PRINCIPIOS DE LA FÍSICA*  
(Basado en conferencia dictada en el marco de las III Olimpíadas  
Iberoamericanas de Física, 1998)  
HÉCTOR RAGO A.  
Grupo de Física Teórica  
Centro de Astrofísica Teórica (CAT)  
Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes  
[rago@ula.ve](mailto:rago@ula.ve)

## A MODO DE INTRODUCCION

*Me hice universo, galaxia planeta  
En mi lomo crecieron animales y selvas*  
Silvio Rodríguez

*Soy parte del sol  
Como mi ojo es parte de mí  
Que soy parte de la Tierra,  
Mi pie lo sabe perfectamente  
Y mi sangre es parte del mar.*  
D. H. Lawrence

Hay quien dice que un escrito no debe ser sino la explicación de su título, de modo que dediquemos unas líneas a considerar lo que será el centro de estas páginas.

La primera parte del ostentoso título es una parodia del libro del conocido escritor y físico Ernesto Sábato, *Uno y el Universo*, y la hemos elegido porque sugiere que el tema será esbozar algunos de los múltiples lazos que nos atan al universo, vistas desde una perspectiva científica. La ciencia es en última instancia (¿o en primera?) una búsqueda del entendimiento de nuestra relación con la naturaleza. Al fin y al cabo todo grupo humano (y tal vez todo individuo) independientemente de su grado de desarrollo cultural, desde un ancestral cavernícola, aterrado por la noche “llena de pavor mitológico”, hasta un tecnocientífico ante una computadora interpretando datos del telescopio espacial *Hubble*, y sin duda un estudiante en trance de participar en unas *Olimpiadas de Física*, se han planteado las grandes preguntas: ¿De dónde salió todo esto? ¿Por qué hay algo en lugar de nada? ¿De qué está hecho el Universo? ¿Es infinito? ¿Tuvo un comienzo o es eterno?, ¿Tendrá un final? ¿Cómo está organizado y por qué?

Pero además se observa a sí mismo y se interroga: ¿Qué hacemos aquí? ¿Cómo llegamos a ser lo que somos? ¿Cuál es el papel de la humanidad en el escenario cósmico? ¿Es relevante o por el contrario es accidental e insignificante? ¿Por qué tenemos la facultad de formular estas preguntas y tal vez hasta de responder algunas?

Y es que el hombre se reconoce parte del universo que piensa y reflexiona acerca del propio universo, “actor y espectador del gran drama de la existencia”.

Naturalmente que estas preguntas fundamentales no son exclusividad de la ciencia. El mito, la religión, la filosofía cada cual con su estilo, imponen orden y le otorgan sentido y lógica a un mundo complejo, multiforme y en apariencia errático e incoherente, pero tras el cual pudiera estar agazapado un sustrato racional y entendible.

Pasemos a la segunda parte del título. La mirada científica de la realidad suele apoyarse en Principios que codifican información sobre una parte de la naturaleza y desde él se catapulta el desarrollo de nuevos conocimientos. A veces estos principios terminan siendo meros resultados de teorías más amplias, pero por inercia histórica no se les degrada y siguen conservando la dignidad de “Principios”. Han cumplido su misión histórica. Una lista nada exhaustiva y sesgada por las inclinaciones del autor, de algunos Principios permite conseguirnos con:

- El Principio de Arquímedes
- El Principio de Pascal
- El Principio de Inercia
- El Principio de Relatividad
- El Principio de Exclusión
- El Principio de Complementaridad
- El Principio de Huygens
- El Principio de Superposición
- El Principio de Mach
- El Principio de Mínima Acción
- El Principio de Conservación
- El Principio de Peter
- El Principio de Saint Exupery

El lector podrá añadir varios más sin demasiado esfuerzo.

### *Estrategia y táctica*

La estrategia es elegir algunos Principios y usarlos como hilo conductor para ilustrar cómo concibe la ciencia algunos de los vínculos entre nosotros y el universo. La táctica consistirá en no dar respuesta a las preguntas

fundamentales pues ya no somos tan jóvenes como para saberlo todo. Sin embargo creemos que será una buena excusa para conocer algunas de las ideas que están urdiéndose para tratar de entender y entendernos más. Entre las ideas que aparecen esbozadas en el trabajo hay algunas ya cimentadas y consolidadas mientras que otras tienen un carácter más especulativo, lo cual tiene también su valor. Pero lo importante es distinguir entre unas y otras, para no arrastrarnos a la confusión.

El orden de las secciones es el siguiente:

Trataremos primero el *Principio de Simplicidad*, suerte de incursión en el mundo de lo simple y lo complejo. Luego el *Principio de Equivalencia* nos acercará a la concepción einsteniana de la gravitación. El *Principio de Incertidumbre* es un pretexto para adentrarnos en la descripción del micromundo cuántico. El *Principio Copernicano o Principio de Modestia Cósmica* nos permitirá enfocar aspectos relacionados con la evolución del Universo. El *Principio de Máxima Entropía* nos enseñará cómo la tendencia al desorden permite forjarnos una noción de tiempo, mientras que el *Principio Antrópico o Principio de Pedantería Cósmica* nos mostrará que bueno es Copérnico pero no tanto. El *Principio de Selección Natural Cósmica* es una reciente idea para tratar de resolver algunas coincidencias que permiten entre otras minucias, que existamos, mientras que en el *Principio del Final* de este trabajo, concluiremos con algunas reflexiones, interrogaciones y más especulaciones.

## EL PRINCIPIO DE SIMPLICIDAD

*Allá en mi tierra hay un gran Simplicio*  
Canción tradicional venezolana

*¿Por qué hacerlo difícil,  
si puede hacerse imposible?*  
Nelson Pantoja

Una anécdota de uso corriente entre los físicos teóricos relata la historia de un colega que opta por un trabajo en una empresa productora de leche interesada en mejorar su producción. Al año y medio de trabajo, le muestra los resultados a los directivos: “Sea una vaca esférica, de radio  $R$ , masa  $M$  distribuida uniformemente, que ingiere gamelote a una tasa constante  $G$ ...” Risible o no, la anécdota ilustra la práctica usual de la física: simplificar el mundo o mejor, una parte de él, despojándolo de lo accesorio y poco relevante y quedándose con lo fundamental, como una manera de hacer tratable el problema a mano, pero que logre capturar sus aspectos esenciales. No otra cosa hizo Newton cuando simplificó al Sol a efectos de

estudiar las órbitas planetarias, al punto de considerarlo una partícula de masa  $M$ , sin importarle de qué está hecho, cuál es su estructura, o composición. El éxito de las ciencias demuestra que es posible conocer algo sin necesidad de conocer todo, y demuestra también que la naturaleza “se deja”, que con suficiente ingenio podemos entender algo de su maquinaria interna; que toda la diversidad y complejidad que atestiguamos (¡sin esa complejidad no estaríamos aquí!) podemos descubrir patrones, regularidades, comportamientos comunes y leyes a cuyos dictámenes obedecería el mundo físico.

La naturaleza nos propone un juego que no es ni tan elemental como el juego infantil de *la vieja* ni tan complicado como para no poder averiguar sus reglas. Una imagen más justa sería la de un observador de una partida de ajedrez cuyas reglas desconoce. Al cabo del tiempo advierte regularidades: el caballo siempre se mueve en  $L$ , el alfil en diagonal... y finalmente descubre que la casi infinita y compleja variedad de jugadas están codificadas en unas cuantas leyes simples.

Pero la pregunta se impone: ¿Es realmente simple el universo? La pregunta admite como respuesta un rotundo depende. Si se le pregunta a un relativista que se ocupe de las leyes de la gravitación o a un físico de altas energías, la respuesta será: sí, la naturaleza es simple. Sin embargo, si se le pregunta a un astrofísico que se ocupe de los procesos de formación galáctica, a un meteorólogo, a un zoólogo o peor aún a un psiquiatra, la respuesta será un gran no. La diferencia de respuestas recuerda la antigua divergencia entre el platonismo, con su mundo de arquetipos simples, perfectos y eternos, del cual nuestro mundo es apenas una sombra imperfecta, y el aristotelismo, más cerca de la complejidad de los seres vivos. En otras palabras, la simplicidad o no del universo depende de dónde se ponga el énfasis, si en las leyes básicas o en los resultados de estas leyes. El mundo físico ha sido severamente violado en su intimidad, desde distancias tan cortas típicas del mundo de las altas energías, donde conseguimos partículas como los electrones, neutrinos o quarks, pasando por la escala de los protones y neutrones, compuestos por quarks, al centenar más o menos de núcleos atómicos, luego, a una escala cienmil veces mayor conseguimos los átomos, luego las asociaciones de átomos en moléculas desde las muy simples hasta las que están formadas por centenares de miles de átomos como las moléculas de proteínas.

Siguen en orden creciente las dobles hélices de ADN y los organismos unicelulares, los seres vivos con su biosfera. Planetas, estrellas decenas de veces mayores que los planetas, galaxias compuestas por centenares de millones de estrellas, cúmulos de galaxias dispuestos en curiosas formaciones filamentosas o paredes, vacíos de miles de millones de años-luz... El universo ha sido estudiado en algo así como el 1% de su tamaño observable, y a todas las escalas conseguimos estructuras relativamente

estables. Sin duda que el mundo es complejo. ¿Cómo conciliar la existencia de leyes fundamentales simples, elegantes y simétricas, con un mundo tan variado, estructurado y diverso? La razón es que no observamos leyes, observamos el producto o el resultado de esas leyes, es decir, soluciones a las ecuaciones. Y en las soluciones entran otros elementos. En efecto, las leyes básicas están formuladas en términos de fuerzas entre diferentes partículas. Por tanto las masas de las partículas participantes, sus cargas, y otras características así como la intensidad de las fuerzas, sus alcances entran en las ecuaciones básicas. Son lo que se conocen con el nombre de constantes o parámetros universales y representan aspectos invariables del universo. Pero las soluciones requieren especificar las condiciones iniciales que en general no son simples ni elegantes. Además la solución no es tan simétrica como la ecuación. La naturaleza evidencia una respuesta muy sensible a la temperatura: a mayor temperatura mayor simetría, mayor simplicidad. A medida que un sistema se enfría, suelen ocurrir cambios estructurales o transiciones que hacen el sistema menos simétrico y más complejo.

Los electrones son objetos simples porque cada electrón es idéntico a otro, a diferencia de una gallina, no por más pequeño. El problema no es de escala sino de complejidad. Cuentan que un astrofísico comenzó una conferencia diciendo: "las estrellas son objetos sencillos..." cuando del fondo del salón lo interrumpieron: "eso es porque estás a 720.000 millones de kilómetros de ellas..." En realidad las estrellas son más simétricas por estar a mayores temperaturas: entendemos más a una estrella que a una gallina, y sabemos más del sol que de nuestra propia Tierra. Como veremos, alguna vez el universo fue muy caliente y muy uniforme y por lo tanto muy simple. Tal vez sepamos más del temprano universo que de los movimientos de las bolsas en las fluctuantes economías latinoamericanas.

Entender el paso de la simplicidad a la complejidad es importante para lograr una mayor comprensión de nosotros mismos y de nuestra relación con el resto del universo. Einstein escribió alguna vez que lo más incomprensible del universo era que es comprensible. Sí, Alberto -de acuerdo- pero esa comprensibilidad amerita una explicación.

## EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

*...el pensamiento más feliz de mi vida.*

A. Einstein

*¿Qué hace la gravedad  
fuera de su cama a medianoche  
William Shakespeare*

¿Por qué la suma de los ángulos internos de un triángulo valen  $180^\circ$ ? ¿Por qué es válido el viejo y usado teorema de Pitágoras? ¿Por qué vale toda la geometría euclídea con la que nos mortificaban en el bachillerato?

La respuesta increíblemente tiene que ver con la gravitación. Veamos cómo. Galileo sabía que la caída de los cuerpos bajo la acción de la gravedad no depende de sus masas. Por lo tanto, si un ascensor se le revienta la cuerda y cae libremente, como todo adentro del ascensor cae con la misma aceleración, una insoportable levedad se apoderará de sus ocupantes y es como si el ascensor se hubiera trasladado al espacio intergaláctico, lejos de cualquier cuerpo donde no hay gravedad: por lo tanto, la gravedad es anulable eligiendo un sistema de referencia apropiado. Análogamente, en un ascensor-cohete acelerado aparecerá un campo gravitacional producto de la aceleración, muy similar al campo gravitacional de la Tierra si la aceleración es la apropiada. En otras palabras, la gravedad puede ser "creada" localmente. Einstein concibió así su Principio de Equivalencia, es decir, la idea de que no hay manera de distinguir (localmente) entre un campo gravitacional real y un sistema acelerado.

Ahora imaginemos un rayo de luz visto por un físico en el ascensor acelerado: la trayectoria se verá curvada por el movimiento acelerado del ascensor. El Principio de Equivalencia sugiere que en un campo gravitacional la luz se curva, porque en caso contrario habría maneras de distinguir entre un campo real y un sistema acelerado. Pero si la luz se curva en un campo gravitacional es porque el propio espacio donde se propaga la luz está curvado. Partiendo de estas ideas (y con una descomunal intuición física) Einstein propuso sus famosas ecuaciones de campo, en las que relaciona el contenido de materia con la curvatura geométrica del espacio tiempo: la materia le dice a la geometría cómo se debe curvar y la geometría le dice a la materia cómo se debe mover.

La teoría de gravitación de Einstein o relatividad general es una hermosa teoría, conceptualmente simple, (aunque sus soluciones puedan ser muy complicadas) que nos describe las propiedades macroscópicas del espacio y el tiempo que subyacen al mundo físico, en todas partes del universo, cada vez que la gravedad juega un rol importante.

Por otra parte, ha salido airosa cada vez que se le ha confrontado con la evidencia observacional o experimental. La igualdad de la caída de los cuerpos, actualmente es verificada con una precisión de una parte en un billón, la rotación de la elipse de los planetas, el comportamiento de relojes a diferentes alturas, la curvatura de los rayos de luz en lentes gravitacionales, la demostración, todavía indirecta de la existencia de ondas gravitacionales, las abrumadoras evidencias de agujeros negros, triunfo definitivo de la atracción fatal de la gravedad y finalmente hasta el comportamiento del universo, como veremos, nos hablan del éxito de la

relatividad en su afán por comprender el funcionamiento a gran escala del mundo físico.

*¿Y qué tiene que ver con nosotros?*

La relatividad nos da la respuesta a la pregunta del comienzo de la sección: la geometría de Euclides es válida porque la gravedad en la Tierra es demasiado débil y sus efectos en la curvatura del espacio no son detectables. Además, gracias a la gravedad nos mantenemos en la superficie de la Tierra y se mantiene la atmósfera que nos permite vivir (por ahora). Gracias a la gravedad, rondamos en las cercanías del sol recibiendo su beneficiosa luz, que por cierto es posible gracias a que la gravedad comprime al sol tanto que en su centro las altas temperaturas ocasionan reacciones nucleares cuya radiación mantiene al sol brillando.

Además, los propios núcleos de los átomos que nos forman fósforo, carbono, oxígeno, nitrógeno, calcio... fueron “cocinados” lentamente en los hornos estelares gracias a la gravedad y dispersados a los cuatro vientos en explosiones violentas al final de la vida de las estrellas llamadas supernovas, gracias a la gravedad. Ese material es posteriormente reagrupado gracias a la gravedad en nuevas estrellas y planetas. Somos sin duda *polvo de estrellas* o mucho menos románticamente, desechos nucleares. Por todo ello, gracias gravedad.

## EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

*Quién salvará este chiquillo  
Menor que un grano de avena*  
Miguel Hernández

*Lo más seguro es que quién sabe*  
Marinela Silva

Hemos reseñado algunos de los éxitos de la relatividad en situaciones donde la gravitación es importante. Pero hay situaciones en las que la gravedad no es relevante. Por ejemplo, la gravedad no juega ningún papel en la estructura molecular, ni en la física atómica, ni en las reacciones nucleares... En el micromundo las fuerzas participantes son muchísimo más intensas que la gravedad de modo que ella no entra en la descripción. Son otras las fuerzas y otras las leyes las que rigen el mundo de lo muy pequeño, y estas leyes están sujetas al Principio de Incertidumbre.

Imaginemos que hacemos un experimento en el cual una ametralladora dispara balas al azar frente de una pantalla que obstaculiza las balas excepto las que entran por dos rendijas pequeñas. Otra pantalla al fondo sirve de detector que registra las balas. Cada vez que llega una bala, suena “click”. Las balas llegan una por una, en unidades discretas. Luego de

muchos disparos. El detector registra dos franjas colocadas simétricamente detrás de las rendijas.

Si repetimos el experimento con ondas, no sonará ningún "click", las ondas llegan continuamente, y el detector registra una serie de franjas llamado patrón de interferencia, zonas claras y zonas oscuras debido a la manera como se superponen las ondas.

Repetamos el experimento ahora usando una fuente de electrones. El detector suena "clicks", es decir, los electrones al igual que las balas vienen en unidades discretas, pero sorprendentemente el patrón es de interferencia, como el de las ondas. Este comportamiento extraño sugiere que las leyes que debemos aplicar no son las de la física clásica. Si intentamos conocer por cuál rendija pasa cada electrón, destruimos la interferencia y obtenemos el patrón correspondiente a las balas. ¿Por qué? Cuando observamos algo debemos iluminarlo con luz de alguna longitud de onda. No podemos determinar la posición del objeto con una precisión mejor que la longitud de onda usada para verlo. Si usamos luz de menor longitud de onda, entonces la energía es mayor y le transmitirá una cantidad de movimiento al objeto y ya no sabremos cuál es su momentum. El análisis preciso llevado a cabo por Heisenberg revela que mientras más precisamos la posición de un cuerpo, más imprecisa se hace su velocidad: el producto de ambas incertezas no puede ser arbitrariamente pequeño. Quien mucho abarca, poco aprieta. Y la limitación no se debe a la tosquedad de nuestros equipos, es una limitación teórica inscrita en la fábrica de la realidad física. En el dominio cuántico no tiene sentido hablar de trayectorias y sólo podemos conocer las probabilidades y no certezas de que un sistema evolucione de determinada manera. Es el reino del azar; lo más seguro es que quién sabe. A medida que los objetos son más grandes, las incertidumbres cuánticas se hacen ridículamente pequeñas y por eso es que no las notamos en nuestra vida cotidiana y macroscópica.

Sobre la base del Principio de Incertidumbre está concebida la física cuántica que rige el comportamiento de los bloques básicos de la materia y de las fuerzas entre ellos: es el llamado *modelo estándar*, capaz de explicarnos en base a unas familias de quarks y leptones, y unos cuantos tipos de bosones o transmisores de fuerzas, los procesos más violentos observados en los aceleradores de partículas, las reacciones nucleares, la estabilidad de la materia, la tabla periódica y la química. Con el formalismo de la Física Cuántica se predijo la existencia de antimateria y con él podemos calcular propiedades del electrón con un error equivalente a calcular la distancia Caracas-Nueva York con un error apenas del grosor de un cabello humano. Además buena parte de la tecnología actual, desde los relojes digitales a los CD, la industria laser, los microchips y los transistores tienen su fundamento en la comprensión de los fenómenos cuánticos.

Eso es lo bueno. Lo malo es que en el modelo estándar aparecen alrededor de veinte constantes o parámetros (masas de las partículas, intensidades de fuerzas, cargas...) cuyos valores no están provistos por el modelo, y deben ajustarse para que la teoría concuerde con las observaciones y experimentos. Los físicos creen (quieren creer) que una teoría verdaderamente fundamental debería permitir calcular los valores de estas constantes a partir de primeros principios.

Por otra parte, la relatividad general y la teoría cuántica, pilares básicos de nuestro entendimiento del mundo físico desde distancias subnucleares a distancias extragalácticas, son incompatibles. La física de lo muy grande y la física de lo muy pequeño usan enfoques diferentes, estrategias diferentes para sus explicaciones, metáforas diferentes, estructuras matemáticas diferentes. El matrimonio entre ambas teorías ha sido decretado más de una vez, pero nunca se ha consumado, o en otras palabras, no disponemos aún de una teoría cuántica de la gravedad. El punto crucial es saber si existe un ámbito en el cual ambas sean cruciales. Veremos pronto que sí, y un ámbito que nos es importante para dilucidar aspectos de nuestra relación con el universo.

## EL PRINCIPIO COPERNICANO O PRINCIPIO DE MODESTIA COSMICA

*... no somos nada..*

Oído en los velorios

*...escudriñando el corazón del Universo...*

Amaury Pérez

Desde tiempos inmemoriales la ostentación humana ha considerado al hombre como centro privilegiado de la creación, motivo por el cual nuestro planeta ha sido concebido como el centro geométrico del universo. ¿Pero ocupa realmente un lugar especial la Tierra? Desde una perspectiva parroquial no hay duda de que sí. No podríamos vivir mucho más cerca del sol, ni mucho más alejados, pero ciertamente no estamos en el centro del universo. La descripción del movimiento planetario se simplificó enormemente al situar al sol en lugar de la Tierra en el centro del sistema solar. Si miramos en una dirección al cielo nocturno veremos el disco blanquecino plagado de millones de soles de nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, pero hay miles de millones de otras galaxias

El Principio Copernicano es la afirmación de que no ocupamos una posición privilegiada en el universo, o mejor, que no existen posiciones favorecidas, ni direcciones privilegiadas. Por lo tanto nuestro universo es aproximadamente homogéneo, y planetas, estrellas, galaxias y cúmulos de

galaxias deben considerarse 'irregularidades locales', y que a gran escala el universo es uniforme. Se estima que un cubo imaginario de unos 400 millones de años luz por lado, pequeño aún comparado con los 15.000 millones de años luz del universo observable, contendrá estadísticamente lo mismo, independientemente de dónde lo coloquemos. Esa es la escala de uniformidad del universo actual.

El Principio Copernicano es un principio de simplicidad. Sugiere que las leyes son las mismas en zonas diferentes del universo, supone que describiendo una parte describimos todo, como en la admonición literaria de Tolstoy, "describe tu aldea y describirás el universo". Por último, supone una enorme simplificación en el tratamiento matemático del universo. Pero el principio debe ser corroborado y esto se hace a través de sus consecuencias.

Cuando juntamos al Principio Copernicano con el Principio de Equivalencia, es decir, cuando consideramos las ecuaciones de la relatividad para una distribución de materia uniforme a gran escala, obtenemos un resultado sorprendente: el modelo de universo que hemos hecho se expande a medida que pasa el tiempo. Esta predicción fue ratificada por el astrónomo norteamericano Edwin Hubble: nuestro universo está en una fase de expansión. Las consecuencias de este hecho representan el cambio más trascendente en la concepción de la realidad física desde Aristóteles: el propio espacio y tiempo no son un telón de fondo contra los cuales referir los procesos físicos, ellos mismos, el universo todo evoluciona y por tanto es susceptible de ser estudiados con el auxilio de la física y la astronomía. La cosmología se transforma en una ciencia histórica y el cosmólogo en una especie de arqueólogo que debe interpretar objetos del universo como "fósiles" de una evolución cósmica, es decir, como productos de procesos físicos que tuvieron lugar en el transcurso de la historia del universo.

Así, juntando el conocimiento de las leyes de la física local, los resultados de un número cada vez mayor de observaciones, varias suposiciones, el poder de cálculo de las computadoras y algo de fe, se ha elaborado, y se continúa elaborando, el modelo del big bang, el paradigma que nos permite interpretar y darle coherencia a lo que nos es dado observar en el universo, desde el inicio de la expansión, unos 15.000 millones de años atrás hasta hoy.

La lógica de la evolución del universo es esta: el universo observable era mucho más pequeño, más denso y más caliente, poblado por una sopa de radiación (fotones) y partículas elementales. A medida que se expande, se enfría. En cada fase debemos estudiar los procesos físicos característicos del régimen de temperatura reinante: por ejemplo, entre un segundo y tres minutos la temperatura es similar a los interiores de las estrellas y por tanto los procesos nucleares son los importantes: en ese lapso se "cocina" un 25% de protones en núcleos de helio.

Luego de 400.000 años el universo es lo suficientemente frío como para permitir la formación de átomos (de hidrógeno y de helio). Los átomos son transparentes a la radiación, de modo que luz y materia no interactúan más y cada cual seguirá su historia por su lado. La materia luego se reagrupará a partir de pequeñas fluctuaciones de la densidad, para formar las actuales estructuras a través de procesos cuyos detalles no están del todo claros.

¿Qué pruebas podemos aducir a favor del modelo del big bang? ¿Cómo sabemos si nuestro universo comenzó con el infierno del big bang como lo sugieren los modelos teóricos? En primer lugar la evidencia inapelable de la expansión, atestiguada por la observación de la luz proveniente de las galaxias lejanas es un fuerte indicio a favor. Además la existencia de la radiación de microondas. Cada centímetro cúbico del universo contiene en promedio unos 400 fotones que no vienen de ningún lugar en particular, o mejor dicho, vienen de todas partes, testigos de una época mucho más caliente, cuando esta radiación estaba en equilibrio térmico con la materia. Cuando el universo era mucho más pequeño, esta radiación tenía una temperatura suficientemente alta como para evitar la formación de átomos: los fotones chocaban frecuentemente con los electrones libres. Y el universo era ópticamente opaco. Cuando el universo se enfrió por la expansión a una temperatura de alrededor de 4.000 °K, ya la radiación no podía evitar la formación de átomos de hidrógeno y de helio. A partir de ese momento (el universo tenía unos 400.000 años), materia y radiación se divorciaron. La materia comenzó a congregarse en estructuras que culminarían en galaxias y estrellas, y la radiación se fue enfriando y hoy tiene una temperatura de 2,7°K.

Otro triunfo del modelo del big bang es que permite predecir la abundancia relativa de elementos ligeros que se “cocinaron” en los primeros minutos del universo: 75% de hidrógeno, 24% de helio, y trazas de deuterio, litio y berilio. En los primeros instantes la expansión fue tan rápida que las altas temperaturas duraron poco, los elementos más pesados tuvieron que esperar algunos miles de millones de años para fraguarse en los hornos estelares.

Hoy los cosmólogos apuestan a que el big bang es tan real como que la Tierra gira alrededor del sol. Que no conozcamos todos los detalles no invalida la visión de conjunto. Somos hijos del big bang y sus huellas están en todas partes. Sólo hay que saber mirarlas.

## EL PRINCIPIO DE MÁXIMA ENTROPÍA

*Quien mira un reloj de arena*

*ve la disolución de un imperio.*

Jorge Luis Borges

*porque el tiempo, el implacable el que pasó,  
siempre una huella triste nos dejó.*

Pablo Milanés

Imaginemos un péndulo ideal, o un choque de una partícula elemental contra su antipartícula produciendo radiación, o un planeta orbitando alrededor del sol. Si filmamos esos sistemas y luego proyectamos la película del final hacia el comienzo, no notaremos nada extraño. El planeta girará en sentido contrario, la energía radiante creará un par partícula/antipartícula y el péndulo simplemente oscilará. Estos sistemas físicos no distinguen el pasado del futuro. Las ecuaciones que los describen no cambian si en ellas cambiamos el tiempo  $t$  por  $-t$ . Dicho pedantemente, las ecuaciones son invariantes bajo reflexiones temporales, y por tanto si permiten una determinada secuencia de eventos, entonces permiten la secuencia inversa.

Desde hace mucho tiempo se sabe que las ecuaciones fundamentales tienen esa simetría, no tienen preferencia por ninguna dirección del paso del tiempo. Sin embargo, es obvio que en el mundo macroscópico y cotidiano la mayor parte de los procesos no comparten esa reversibilidad. Romper un vaso, quemar un fósforo, dictar una conferencia, envejecer, la explosión de una supernova, un gas expandiéndose, son procesos que proyectados 'hacia atrás' resultan absurdos. Ellos distinguen claramente el pasado del futuro y por tanto señalan una 'flecha del tiempo', una dirección privilegiada.

La pregunta entonces es ¿cómo conciliar la existencia de procesos asimétricos en el tiempo con unas leyes neutras o simétricas? La respuesta está de nuevo en que la naturaleza no está hecha de leyes, sino de sus productos, de sus resultados. Sucede que en los resultados entran además las Condiciones Iniciales, es decir, la información acerca del estado particular en que se encuentra un sistema determinado en un tiempo dado. Resulta que hay conjuntos de condiciones iniciales más improbables que otros. Cuando un sistema tiene condiciones iniciales improbables, decimos que está ordenado, y le asignamos un valor bajo de una magnitud, la entropía, que cuantifica el desorden de un sistema. Los estados con mayor desorden son los más numerosos, por tanto los más probables: los de máxima entropía.

Imaginemos un gas dispuesto momentáneamente en un rincón del recipiente. Está en unas condiciones iniciales poco probables, está ordenado y tiene un valor pequeño de la entropía. Cuando evoluciona, lo hace llenando el recipiente de manera uniforme, porque de esa manera

aumenta la entropía. Cuando logra el equilibrio, la entropía habrá alcanzado un máximo, y a pesar de los cambios microscópicos, nada cambia macroscópicamente, por tanto desaparece la flecha del tiempo. El principio de máxima entropía establece la tendencia de los sistemas físicos cerrados que no están en equilibrio termodinámico, a aumentar su entropía hasta alcanzarlo.

El descubrimiento del principio de máxima entropía en el siglo XIX produjo un fuerte impacto en círculos humanísticos, porque aplicado al universo entero, sugería un momento en el cual todas las temperaturas se habrían igualado, y el equilibrio termodinámico imposibilitaría cualquier proceso de intercambio de energía, en particular los procesos biológicos: significaría la muerte térmica del universo.

La pregunta es, ¿por qué ese momento no ha llegado aún, permitiéndonos disfrutar de una flecha del tiempo? Si el universo es eterno, tal y como se concebía en el siglo XIX cualquier proceso transitorio tendría que haber ocurrido ya. Salvo que fuésemos producto de una gigantesca fluctuación. La única otra posibilidad es que la existencia de una flecha del tiempo nos esté sugiriendo que el universo comenzó a existir hace algún tiempo atrás: existe una flecha del tiempo porque el universo emergió ordenado, y hoy, quince millardos de años después, continúa desordenándose, en parte gracias a la propia expansión que conspira para que el equilibrio no se logre.

Pareciera haber algo paradójico en todo esto, porque para hacer sus cálculos (exitosos), los cosmólogos invocan un universo homogéneamente lleno de materia y radiación en equilibrio, por tanto muy desordenado. El espectro de la radiación de microondas confirma espectacularmente este equilibrio. Entonces, ¿cómo pudo ser ordenado el big bang si la materia y la radiación estaban totalmente desordenadas? La respuesta está en la gravedad y su alevoso comportamiento termodinámico. La gravedad tiende a aglutinar la materia. El desorden gravitacional se acentúa a medida que se crean más y más estructuras y la materia se ordena más y más. Un agujero negro representa el máximo de entropía para una masa dada. El universo nació con alta entropía de materia y radiación, y baja entropía gravitatoria. A medida que el universo se enfrió y se formaron galaxias y estrellas, la entropía de la materia disminuyó a expensas de la entropía gravitacional.

Entender por qué el big bang fue ordenado es entonces entender por qué la entropía de la gravedad era tan baja. Y esto no lo podemos entender aún porque ni siquiera disponemos de una expresión unánime para calcular la entropía de la gravedad, pero también, debido al desconocimiento de la física necesaria para que nos guíe a instantes cercanos al big bang. La ausencia de una teoría cuántica de la gravedad nos impide conocer, si como sugieren algunos, un principio fundamental determina las únicas condiciones iniciales en el origen de nuestro universo.

## EL PRINCIPIO ANTROPICO

*El universo sabía que veníamos.*

Freeman Dyson

*Accidente: sustantivo, ocurrencia inevitable  
debida a la acción de inmutables leyes naturales.*

Ambroce Bierce

Desde tiempos remotos, filósofos, místicos, religiosos, borrachos y hasta físicos han especulado acerca del posible rol de la humanidad en el teatro del universo. Los puntos de vista abarcan todas las posibilidades, desde que somos la razón y *leit motiv* del universo, hasta que somos un accidente episódico y prescindible en la gran marcha del universo del big bang hasta quién sabe donde.

Más allá del privilegio que nos depara el estar en la Tierra, a una distancia prudencial del sol, disfrutando de la medianía de unas temperaturas ni muy calientes ni muy frías, y otros “accidentes” que facilitan nuestra existencia, desde que se entendió la evolución del universo como la manera en que se fijan las condiciones cósmicas, se han descubierto una serie de coincidencias sin las cuales sería imposible el desarrollo de la complejidad organizada, incluyendo a la vida. Señalemos algunas de ellas.

- Las condiciones excepcionales del big bang, que le confieren una flecha del tiempo al universo como señalamos más arriba.
- Si la fuerza nuclear fuese más fuerte, la nucleosíntesis sería más eficiente y no hubiese hidrógeno. Si fuese más débil no hubiesen núcleos más pesados.
- Si la masa del electrón no fuese tan parecida a la diferencia de masas entre el neutrón y el protón, no hubiera hidrógeno.
- Si el neutrino interactuase más fuertemente con la materia, quedaría atrapado adentro de las estrellas. Si la interacción fuese más débil, escaparía libremente. En ambos no existirían supernovas para dispersar los elementos pesados fundamentales para la vida.
- Si la gravedad fuese más intensa, las temperaturas en los centros de las estrellas serían mayores y su evolución sería diferente. Si fuese menos intensa, no se alcanzarían las temperaturas para elaborar los elementos pesados.
- Si el grado de inhomogeneidad de la materia en los primeros instantes del universo no fuese de unas cuantas partes por millón sino menor, no se hubiesen creado estructuras. Si fuese mayor, tendríamos exceso de estructuras, huecos negros monstruosos por doquier.

- Si la constante cosmológica fuese muy alta, el universo hubiera recolapsado demasiado rápidamente.

Hay quien ha calculado la probabilidad de que eligiendo al azar los valores de los parámetros del modelo estándar desemboquemos en un universo poblado de estrellas, condición necesaria para la existencia de vida. La probabilidad es alrededor de ¡una parte en  $10^{126}$ ! ¿Cómo entender este 'afortunado accidente' que nos permite estar aquí?

Se han vislumbrado tres salidas posibles: El Principio Antrópico, el Principio de Selección Natural y la Teoría Final.

El principio antrópico es un enfoque que pretende usar el hecho de nuestra existencia, como un dato a ser tomado en cuenta en la elaboración de las teorías del universo, es decir, que bueno es Copérnico, pero no tanto. En sus versiones más elementales establece que si el universo fuese incompatible con la vida, no hubiese nadie para asombrarse de su diseño. Es como un condenado a muerte que tras escuchar el tronido de los fusiles que lo ejecutan, descubre para su sorpresa que todos fallaron y está vivo. Claro, si no hubiesen fallado, no hubiera podido sorprenderse. Es la constatación de una coincidencia, no su explicación.

El principio antrópico ha servido para reforzar algunas especulaciones acerca de universos múltiples, universos paralelos, megauniversos, multiversos o como quiera llamárselos. Algunas propuestas del universo muy temprano suponen que hubo una fase de expansión acelerada que se llama fase inflacionaria. Si esta inflación es genérica, es posible que nuestro universo sea apenas una burbuja en expansión, de todo un sistema de burbujas que permanentemente están surgiendo, otros universos quizá con leyes y constantes diferentes de las nuestras. De todos estos universos sólo un subconjunto será apto para la vida. El nuestro pertenecería a este conjunto. Es como buscar en un closet infinito lleno de ropa de todas las tallas posibles: siempre conseguiremos un pantalón que nos sirva. Estas propuestas nos lucen demasiado especulativas.

El principio antrópico no es verificable ni tiene poder predictivo más allá de decir que el universo es grande porque es viejo para poder elaborar en las estrellas los elementos pesados que nos componen, y como es viejo y se expande, entonces es grande. Nada que no hayamos sabido antes.

El principio antrópico rompe con el esquema reduccionista que todavía tiene batallas que librar y triunfos que obtener. Por último, pensar que toda la inmensidad del universo fue concebida para el uso exclusivo nuestro ¿no supone un exceso de soberbia?

## PRINCIPIO DE SELECCIÓN DARWINIANA

*La naturaleza se ha vuelto loca,*

*a pesar de lo que digan los libros.*

Michael Pfeiffer en Las Brujas de Estwick

Ante las evidentes dificultades de la física para responder y resolver algunas preguntas y acertijos fundamentales, algunos investigadores han vuelto la mirada a otro tipo de explicaciones, como la que emplean los biólogos para dar cuenta del alto grado de complejidad de los seres vivos: la selección natural.

Las observaciones indican que los sistemas físicos a escala astronómica evidencian mecanismos de retroalimentación y control característicos de los sistemas biológicos. ¿Por qué no pensar en que las propias leyes se fueron ajustando a través de un proceso de selección cósmica darwiniana?

El físico norteamericano Lee Smolin, por ejemplo, arguye que no es necesario invocar leyes trascendentes al propio universo que en el fondo siempre nos dejarán con la ignorancia del origen de esas leyes. El mecanismo propuesto por Smolin supone que cada agujero negro que se forma en nuestro universo, desemboca en un universo nuevo, descendiente del nuestro. Nuestro universo, a su vez viene de un agujero negro en otro universo. Los valores de los parámetros del universo hijo son levemente diferentes de los del universo del cual provienen. Si los descendientes heredan valores inapropiados para la formación de estrellas, y por tanto de agujeros negros, entonces esa descendencia desaparecerá por no poder 'procrear' nuevos universos. Así, de generación en generación los valores de los parámetros se han ajustado a los que hoy constatamos. Naturalmente que todo esto luce algo delirante y hasta provocador, pero Smolin argumenta que su propuesta es verificable o refutable a pesar de que nunca tendremos contacto causal con otros universos. Si los parámetros del modelo estándar se han ajustado para optimizar el número de agujeros negros, entonces basta corroborar si alguna variación en estos parámetros logra producir más aún. De ser así, la propuesta resultaría falsa. Hasta ahora la propuesta ha resistido.

## EL PRINCIPIO DEL FINAL

*Al final de este viaje está el horizonte  
al final de este viaje partiremos de nuevo.*  
Silvio Rodríguez

*¿por qué yo?  
siempre yo.*  
Sergio R.

Sin duda que el siglo XX ha sido testigo de un avance sin precedentes en nuestra comprensión de la maquinaria del universo. La física cuántica y la relatividad general deben ser motivo de orgullo para las generaciones de físicos que han constatado su habilidad para hablarnos del mundo. Sin embargo, la revolución que ellas emprendieron aún no ha sido completada, y esto se revela tal vez en los acertijos e incógnitas en algunos de los más interesantes aspectos del universo.

Los físicos apuestan porque una teoría final logrará explicar estas incertidumbres que hacen que el universo sea como es, y que permiten que estemos aquí.

Lo que los físicos llaman una teoría final no es un Principio que provea todas las respuestas y todas las explicaciones a todos los eventos que ocurren en la naturaleza. Es algo mucho más modesto que eso. La sospecha es que a muy altas energías existe una teoría unificada que amalgama y funde las diferentes fuerzas de la naturaleza en un solo formalismo. Actualmente el mayor de los problemas es cómo incluir a la gravedad en el esquema en donde las otras fuerzas están relativamente unificadas.

Si se descubre tal teoría, que algunos suponen que ya fue descubierta y es la teoría de supercuerdas, eso no significa la desocupación laboral de los físicos, ni siquiera de los físicos teóricos, de la misma manera que haber desentrañado las leyes de la física nuclear no terminó con los físicos atómicos ni con la física molecular. Tampoco significa que entenderemos todos los aspectos del universo. Por ejemplo, conocemos bien las interacciones básicas entre los átomos de un fluido y sin embargo el fenómeno de la turbulencia se resiste a una comprensión adecuada. Por otra parte, las rupturas de simetrías y accidentes históricos introducen un elemento de azar que dificulta tremendamente saber cuáles aspectos del universo están signados por la teoría final son consecuencia inexorable de ella, y cuáles son meras contingencias que pudieron ser de otro modo.

Por supuesto, la existencia de tal teoría no está garantizada, es posible que descubramos nuevos niveles con nuevas características para cuya descripción se requiera nuevas fuerzas y nuevos elementos. El optimismo de los físicos se basa en que el patrón de explicaciones a través de los principios y teorías, pareciera converger. Una analogía conveniente es que la realidad está formada por estratos o capas como una cebolla, y vamos progresivamente entendiendo esas capas más profundas con principios cada vez más generales. Lo importante es saber si hay infinitas capas, o como sugiere Steven Weinberg, un número limitado de ellas; y de ser así, si seremos capaces de elaborar los conceptos claves que nos permitan dar con la teoría final. Esto nos lleva a referirnos al último punto de este trabajo.

*¿Por qué nosotros?*

Esta pregunta contempla dos aspectos. El primero, ¿por qué es precisamente esta generación a la que le es dado 'entender' al universo como el resultado de un proceso evolutivo que comienza con un big bang y es capaz de desarrollar las complejidades necesarias para el desarrollo de la vida? En realidad cada época en los últimos siglo ha atestiguado la comprensión de una parte de la realidad. Sólo una generación entendió por primera vez la manera como orbitan los astros alrededor del sol gracias a la gravitación. Otra generación entendió por primera vez que la luz es un fenómeno electromagnético y otra los misterios del núcleo atómico.

Un segundo aspecto más fundamental es por qué precisamente la humanidad tiene esa posibilidad de comprender la estructura del mundo físico. ¿Es el milenario y ardoroso proceso de ajuste entre el ambiente y nuestro cerebro el responsable de inculcarnos categorías del pensamiento aptas para comprender la naturaleza? No hay duda que este ajuste nos lleva a comprender patrones. Eso es una ventaja evolutiva, pero ¿cómo se garantiza mejor la supervivencia darwiniana entendiendo la estructura de los agujeros negros o la teoría de quarks?

Tal vez el dilema tenga un paralelo en el arte. Es claro que el lenguaje, hablado o escrito, representa una ventaja adaptativa, mejora las posibilidades de supervivencia, al igual que la habilidad de dibujar señales en la pared de una gruta, pero de allí a Cervantes o a Miró ¿por qué? Sin duda porque "ambas, ciencia y arte, son actividades creativas que producen mundo... ambas descifran estratos ocultos o inusitados de la realidad...En su origen y en su fluencia forman, pues, parte de un mismo manantial".

Esa regalía que nos brinda la naturaleza ¿nos permitirá deodificar la presunta teoría final? ¿Seremos suficientemente astutos como para desenmarañarla y saber qué nos está informando?

No lo sabemos y tal vez no lo sabremos nunca. Sin embargo el esfuerzo y el viaje habrán valido la pena y habremos aprendido un montón acerca del universo, acerca de nosotros mismos y acerca de la relación entre nosotros y el universo. Y quizá consigamos la respuesta al hermoso subtítulo que el premio Nóbel Leo Lederman usó en uno de sus libros: Si el Universo es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?

## LECTURAS SUGERIDAS

John Barrow; *Theories of Everything*, Oxford University Press, 1991.

Paul Davies; *The Mind of God*, Simon & Schuster, 1992.

George Ellis; *Before the Beginning*, Boyars/Bowerdean, London, 1994.

Murray Gell-Mann; *The Quark and the Jaguar*, W. H. Freeman, N.Y., 1994.

Leo Lederman; *La Partícula de Dios*, Grijalbo Mondadori S.A., Barcelona 1996.

Jesús Alberto León; Un Mismo Manantial, Revista Imagen, Vol. 30, 8, 1998.

Lee Smolin; *The Life of the Cosmos*, Oxford University Press, 1997.

Steven Weinberg; *Dreams of a Final Theory*, Phanteon Books, N. Y., 1992.