



La ruta del Big Bang

El universo en clase turista

MARCIA HENRÍQUEZ



EDITORIAL
USACH

adain

LA RUTA DEL BIG BANG

El universo en clase turista

© Editorial Universidad de Santiago de Chile
Av. Libertador Bernardo O'Higgins 3349
Santiago de Chile
Tel.: +56 2 2718 0080
www.editorial.usach.cl
Instagram: @editorialusach
Twitter: @Editorial_Usach
Mail: editor@usach.cl

© Marcia Henríquez Bustamante

Inscripción N° 297.784
I.S.B.N. edición impresa:
I.S.B.N. edición digital:

Diagramación y diseño: Andrea Estefanía
Diseño de portada: Andrea Estefanía
Ilustraciones de relatos: Marcelo Parrao

Primera edición, diciembre 2024.

Colección ADAIN

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida en manera alguna ni por ningún medio, ya sea eléctrico, químico o mecánico, óptico, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo de la editorial.

Impreso en Chile

Marcia Henríquez Bustamante

LA RUTA DEL BIG BANG

El universo en clase turista



AGRADECIMIENTOS

Antes que todo, quiero expresar mis agradecimientos a la Vicerrectoría de Vinculación con el Medio, por la publicación de este libro.

De la Facultad de Ciencia, Departamento de Física, doy gracias al académico Dr. Guillermo Palma por la colaboración prestada, toda vez que solicité su ayuda; así como también al Dr. Andrés Navas, académico del Departamento de Matemática y Ciencias de la Computación.

De la Facultad de Química y Biología, quiero expresar mis agradecimientos a su Decana, la Dra. Leonora Mendoza, por su permanente apoyo, confianza y estímulo. Por sus contribuciones en la revisión de uno o más capítulos, quiero agradecer a las siguientes personas: al Dr. Alexis Aspeé, a la Dra. Ana María Campos, al Dr. Juan Pablo García-Huidobro y al Dr. Jorge Pavez. También agradezco al Dr. Juan Guerrero por ayudarme a brindar una descripción coloquial de la resonancia magnética nuclear.

Dicho lo anterior, me permito agregar que la elección de los contenidos, el nivel de profundidad con que se abordan y la forma de tratarlos son de mi exclusiva responsabilidad.

Agradezco también:

A los integrantes del Club Lector de la Biblioteca de Isla de Maipo, por el interés prestado en el avance del escrito.

A Flor Henríquez, porque en su rol de público objetivo al que está dirigida esta publicación, asumió la lectura con tremendo entusiasmo.

A Daniela García, por su exhaustivo, inquisitivo y comprometido trabajo de edición.

A Camila Barrientos, por su estupendo croquis de Edwin Hubble.

A mis hijos, Laura y Cristóbal, por sus preguntas curiosas, sus oportunos silencios y la paciencia de ambos, cuando más la necesitaba. Debo agregar que Laura realizó la mayoría de las figuras incluidas en este texto.

A Fernando, por compartir conmigo su pasión por las estrellas.

Finalmente, quiero añadir que tengo varias buenas razones para agradecer a Dios en lo que respecta a este libro, no obstante, he de manifestar sólo una, y es esta: nunca me he sentido obligada a elegir entre Ciencia y Fe. Ambas me han acompañado amablemente por carriles separados; la Fe, esperando “arquetipos y esplendores del otro lado del ocaso”, como tan bellamente lo expresara Borges, que se declaraba agnóstico, y la ciencia... bueno, ya sabemos que la ciencia no es fe.

Santiago, abril 2019

ÍNDICE

PRÓLOGO AL LECTOR.....	13
De gatos cuánticos y niñas cuánticas.....	19
CAPÍTULO I	
LADRILLOS PARA EDIFICAR EL CONOCIMIENTO	
SOBRE EL UNIVERSO.....	23
EL VIAJE INESPERADO: DEL MUNDO CLÁSICO	
AL MUNDO CUÁNTICO	25
CONSTRUYENDO UN MODELO DE ÁTOMO	27
Más pequeño que un átomo.....	39
UN MUNDO PARALELO	41
LAS FUERZAS DE LA NATURALEZA	44
Boceto de una mañana luminosa	53
CAPÍTULO II	
LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	61
LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	63
LOS PERSONAJES TRÁS EL CONCEPTO DE ELECTROMAGNETISMO	68
INTERACCIÓN DE LA LUZ CON LA MATERIA	74
Las regiones de la radiación electromagnética	77
EL ESPECTRO DEL SOL.....	84
Las líneas de Fraunhofer.....	84
Los experimentos de Kirchhoff y Bunsen	86
Espectros: huellas digitales de los elementos químicos.....	87
EL NACIMIENTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA	89
La radiación del cuerpo negro	89
Los cuantos de Planck o los fotones de Einstein.....	92
GALAXIAS QUE SE ALEJAN.....	94
El efecto Doppler en el sonido	94
El efecto Doppler en fuentes de luz en movimiento.....	95

Historia de la muchacha que se iba a dormir muy tarde	99
CAPÍTULO III	
LA TEORÍA DEL BIG BANG.....	103
ASIMILANDO QUE HABITAMOS UN MUNDO EXTRAÑO	105
COMENZANDO POR EL PRINCIPIO	106
El Big Bang en dos pinceladas	106
El funcionario en una oficina de patentes: “ese tranquilo claustro”	108
El caso especial de la Relatividad Especial.....	110
En las reacciones químicas no manda Simón; manda Lavoisier	119
Reacciones nucleares y la ecuación más famosa.....	121
LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL.....	125
Principio de equivalencia de la Relatividad General	130
Comprobación de la teoría de la Relatividad General	135
HUBBLE CAMBIA LA VISIÓN DEL UNIVERSO	139
LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO Y EL DESPLAZAMIENTO AL ROJO	142
CRÓNICA DE UNA EVIDENCIA ESPERADA: LA RADIACIÓN DE FONDO	144
LA MECÁNICA CUÁNTICA PIDE LA PALABRA	145
LA TEORÍA ESTÁNDAR DEL BIG BANG CON ETAPA INFLACIONARIA	151
La Planitud.....	153
En solo tres minutos.....	154
LA MATERIA Y LA ENERGÍA OSCURAS.....	160
La materia oscura	160
La energía oscura	162
Corroborando la Teoría del Big Bang inflacionaria.....	164
De búhos y alondras	167
CAPÍTULO IV	
NACIDAS PARA BRILLAR.....	171
ESAS LABORIOSAS ESTRELLAS	173
DIARIO ÍNTIMO DEL SOL (y su estrecha relación con la Tierra)	174
UNA DIGRESIÓN SOBRE LAS COMPLICACIONES DE LA VIDA.....	176
NO ES LO MISMO SER BRILLANTE, QUE SER LUMINOSA	179
EL DIAGRAMA HR.....	182
NUCLEOSÍNTESIS EN UNA ESTRELLA COMO EL SOL	184
LA VIDA DE LAS ESTRELLAS SEGÚN SU MASA	188

Estrellas de masa intermedia	188
La corta vida de una gran estrella	194
El estallido de una supernova	198
BREVES NOTAS SOBRE UNA GRAN HISTORIA	203
El retorno glorioso de Ricitos de Oro.....	203
Los ocho umbrales	204
 OTRAS LECTURAS	 209

PRÓLOGO AL LECTOR

Estimado lector: usted está aquí.

Tiene este libro en sus manos y si no consigo llamar su atención en las próximas cinco líneas, va a dejarlo abandonado sobre la mesa. Me temo que no tengo otra alternativa que decirle la verdad sin algodones, ni suavizantes, ni "Photoshop", sino solo la verdad a secas: mi única intención, es que usted haga valer uno de los más profundos derechos del ser humano, su bandera de lucha más ancestral, esto es, acceder al conocimiento; el derecho a saber. ¿Acaso no fue que "por probar el fruto del árbol de la Ciencia", nuestros ancestros fueron expulsados del paraíso? Pues bien, ¡arriesguémonos una vez más!

Mirado en retrospectiva pareciera, como nunca antes, que la cultura se encuentra al alcance de la mano; tanto si se es usuario natural de la tecnología, como si se prefiere la íntima experiencia de sumergirse en las páginas de un libro; hay opciones para convertirse, culturalmente hablando, en la persona que se quiere ser.

La oferta es amplia, usted es el regalón: ¿novela negra? ¿placeres culposos? ¿literatura clásica? ¿libros de autoayuda? ¿tiras cómicas llenas de sarcasmo? ¡Amén! La decisión es suya. Ir por la vida de hip-hopero denunciando la injusticia social, entregarse con idéntica pasión a la música docta o empaparse de energía al ritmo desenfrenado del tamborileo callejero; son todas opciones absolutamente válidas.

Es su prerrogativa.

Sin embargo, toda esa luminosa diversidad con que aparecen bañadas cada una de esas opciones culturales,

tiene una ingrata condición de borde; un terreno baldío que nos nivela a todos... una especie de pantano a orillas del Neva. Me explico: alrededor del año 1700, Pedro el Grande, zar de todas las Rusias, decidió construir la ciudad de San Petersburgo en la desembocadura del río Neva. Aquel era a todas luces un completo disparate. Donde él veía desplegarse un paisaje maravilloso; los ingenieros (alemanes y holandeses), sin otra opción que contribuir al cumplimiento de los deseos de aquel hombre (gigante, loco, visionario y cruel), veían solamente lodo. En kilómetros a la redonda no había madera, ni piedras, ni material alguno que se prestase gustoso a ser usado en la edificación; no obstante, San Petersburgo es hoy conocida como "la Venecia de Rusia", pero es justo y necesario recordar, que sus cimientos fueron echados en medio del dolor y la inclemencia. Podríamos hoy, a fuerzas de reventar tarjetas de crédito, visitar San Petersburgo, recorrerla, disfrutarla, sin haber contribuido jamás a cargar ni una sola piedra de ninguna de sus murallas... Vaya, al parecer no queda otro remedio que sucumbir ante tamaña y contradictoria metáfora, porque existe otra ciudad, más bella aún, construida con piedras que no parecen tan difíciles de cargar: la inteligencia, la pasión, el sacrificio, la tenacidad, la perseverancia; sin embargo, de esa ciudad, nos sabemos relegados; la miramos de lejos, como si fuese una fruta inalcanzable, prohibida... A fin de cuentas, somos compañeros en un pantano, aldeaño a una ciudad que ya se encuentra edificada... y fortificada.

Hay algo doloroso y triste en admitir que una de las tantas miradas que se le puede dar a la cúspide del conocimiento científico, es que por su propia naturaleza, por el grado de experticia que supone, genera un abismo entre sus propios constructos y la gente común: nosotros.

Pues bien, este libro es una incitación a adentrarse, una invitación a recorrer en esa "ciudad amurallada", un ámbito específico: la **Astrofísica**. Porque usted y ellos y yo, tenemos derecho a entender. Le pido, por favor,

que deje de pensar que usted no tiene por qué saber. Le daré una sola buena razón para que se le vuelvan imperiosas las ganas de reclamar este derecho; ¡el conocimiento produce placer! Un cierto goce capaz de desbordar en alegría al más desencantado; un estado de ánimo de felicidad. Me confieso: hace ya algunos años comencé a recorrer este camino; he vivido las emociones y el asombro; he reído como una niña para sobrellevar con humor las profundidades de mi propia ignorancia, y he experimentado no sólo la necesidad, sino el arrebató, de compartirlo.

He de ser honesta: existen en librerías una amplia gama de trabajos de divulgación donde se abarca Astrofísica, Astronomía, Cosmología. Sin lugar a dudas, la mayoría de ellos son libros buenísimos y suelen estar escritos por científicos expertos. Haber acudido precisamente a gran parte de esa literatura fue lo que me impulsó a escribir este texto, porque he podido darme cuenta que, más a menudo de lo que uno quisiera, el experto no imagina hasta qué punto ese lector lego es verdaderamente un profano del conocimiento en el área. Por esa razón habrán diversos tópicos explicados en este libro **sin asumir** que el lector “tendría que tener” un conocimiento previo. Por la misma razón, recorro a diversas analogías, que involucran sus sentidos y sus emociones, para encauzarlo a capturar estos conceptos que, cuando no son áridos, como dirían mis hijos (protagonistas de los recientes usos del lenguaje); son francamente “**bizarros**” (queriendo decir con ello, que son conceptos extraños).

Me vuelvo a confesar: pocas veces en la vida he sentido tanto asombro como cuando asimilé que la Teoría del Big Bang se apoya en el marco teórico que constituye la Teoría de la Relatividad General de Einstein... Y no fue mucho lo que logré aproximarme; agité mi pañuelo para saludar de lejos a un par de gemelos paradojales a quienes Einstein hizo muy famosos. No obstante, tendré el atrevimiento de presentárselos: cada quien es dueño

de decidir si seguir caminando con ellos, o de limitarse (como yo), a saludarles agitando un pañuelo. Debo aclarar que este texto está dirigido a personas entre los 15 y 95 años; el único requisito de acceso es mantener vivo el interés por aprender. A mi edad –el promedio aritmético entre ambas–, uno valora el conocer detalles de la vida de la gente, y es que el conocimiento de la naturaleza y el Universo no exige a los científicos de pagar el arriendo, de enamorarse, de las dudas fantasmales frente a un resultado inesperado, o de la vanidad cuando el éxito sobrepasa la justa medida. Por eso, toda vez que resulte un aporte, algo se dirá del ser humano que habita en el científico.

El libro está estructurado en capítulos. A mi juicio, es óptimo adentrarse a la lectura en el orden establecido, sin embargo, es decisión del lector: quien podrá comenzar directamente por los capítulos III y IV, donde realmente se entra en materia; e ir a buscar en las páginas previas, elementos complementarios o aclaratorios. Un texto de divulgación no pretende ser comprendido por entero a la primera lectura; me permito sugerirle que no se niegue la oportunidad de darle curso a la emoción, toda vez que acceda a algún concepto que previamente sentía vedado; disfrútelo.

El capítulo I pretende recorrer la distancia que sea necesaria para ir a buscar los ladrillos con que se ha construido este conocimiento; por eso, allí hablaremos de las fuerzas de la naturaleza, comenzando por la más familiar de todas: la fuerza gravitacional; les relataré los pasos que se han dado para llegar a formular un modelo, en que la naturaleza está formada por partículas, y de la necesidad de que existan otras partículas aún más sutiles, encargadas sólo de mediar en interacciones. En el capítulo II invitaré a una de esas fuerzas, responsable del origen de la radiación electromagnética, a ocupar el sitio que le corresponde junto a la fuerza gravitacional en nuestra concepción del mundo, porque si la gravedad nos tiene con los pies sobre la tierra, en la mayoría de los fenómenos

que nos suceden, desde obtener energía de la luz del Sol para que la vida sea posible, hasta en los grandes avances tecnológicos; es la fuerza electromagnética la que se ve involucrada. En el capítulo III, siempre a modo de relato, revisaremos la Teoría del Big Bang; daremos un vistazo al marco teórico que la sostiene, esto es, a la Teoría de la Relatividad General, describiendo en unas pocas líneas la Relatividad Especial. Comentaremos el cómo y el cuándo de las evidencias experimentales, que indican que tales teorías han explicado exitosamente diversos fenómenos de la naturaleza.

Nos acompañará en el trayecto una niña, morena y preguntona; Alen, que vive en la ciudad, pero pasa las vacaciones con su abuelo, cerca de Villarrica, a orillas del Liucura. A Alen le gustan los cuentos, las historias. Su libro favorito es una versión ilustrada de "Ricitos de Oro", que le regalaron en su cumpleaños; dice que le recuerda la casa de su abuelo, allá en el campo. Aunque sospecho que hay otra razón. Tal vez me oyó repetir las afirmaciones de Fred Spier en su *"Big History and the Future of Humanity"*. Esto es, que para comprender el conjunto de situaciones y secuencias que han debido darse en la evolución del Universo (desde el Big Bang, hace trece mil ochocientos millones de años, hasta la vida sobre la Tierra como la conocemos hoy), el relato de Ricitos en la cabaña de los tres osos, resulta un simpatiquísimo material de consulta. Más adelante lo comprenderán.

El capítulo IV estará dedicado a explicar la generación de los elementos químicos, tanto de aquellos sintetizados durante el Big Bang, que han existido desde el inicio del espacio y el tiempo, como aquellos que se generan en los procesos evolutivos que experimentan las estrellas. Destacaremos, inevitablemente, los escandalosos recursos de las estrellas masivas para completar dicha tarea, y la belleza de la que hacen gala para repartir elementos recién horneados por el Universo circundante; porque, como se ha dicho hasta el cansancio, cada uno

de los átomos que forman las moléculas, que forman las células, que forman los tejidos, que forman los órganos, que forman los sistemas, que forman nuestros cuerpos... o bien son tan antiguos como el Big Bang, o bien surgieron en el estallido de alguna supernova; que es ese material del que estamos hechos.

Por las tardes,
Alicia y Gato se
reunían en la sala
y jugaban *Marco
Polo*.



DE GATOS CUÁNTICOS Y NIÑAS CUÁTICAS

Llegaba del colegio a las cuatro de la tarde, entraba sigilosamente por la puerta de la cocina para que su madre, que a esa hora preparaba el material para sus clases de alfarería, no la oyese volver a salir. Cuando su madre gritaba «¡Alen!», la chiquilla loca ya iba soplada doblando la esquina en bicicleta. Nunca regresaba antes de haber dado 17 vueltas a la manzana, ni siquiera cuando tenía mucha tarea... excepto, si la tarea era escribir un cuento.

Una versión libre de "Alicia en el país de las Maravillas", usando palabras relacionadas con: ubicuo, sardónico, probable, esparcir, volumen, densidad y colapso. De eso se trataba el cuento que debía escribir, y aunque ya tenía el significado de las palabras, no se venía fácil la tarea. Ella hubiese preferido inventarle una historia a "Ricitos de Oro"; le encantaba la idea de que sucediesen cosas precisas en el momento preciso y que hubiese osos de por medio, pero lo de Alicia no estaba mal. Después de la quinta vuelta en bicicleta, se devolvió a su casa porque la imaginación le desbordaba la mente. No fue posible negociar; un tazón de leche tibia la esperaba sobre la mesa.

—¿De qué se trata el cuento que escribirás? —le preguntó su mamá, cuando la vio afanada sobre el cuaderno.

—De una niña llamada Alicia, que juega con un gato —le respondió ella, sin levantar la vista.

—¿Y cómo se llama el gato? —insistió su madre.

—El gato se llama Gato —le contestó mirándola fijamente, y su madre entendió que no debía volver a interrumpirla.

He aquí la historia que escribió Alen:

Por las tardes, Alicia y Gato se reunían en la sala y jugaban *Marco Polo*. Lo cierto es que Gato hubiese preferido jugar "Chevé Chevé, bese al gatito que le guste a usted", pero como veremos, Alicia tenía buenas razones para no jugar Chevé Chevé; al menos, no con un gato.

Como es sabido, el famoso felino de sonrisa sardónica es ubicuo; puede, en un volumen contenido, esparcir su densidad gatuna en todo lugar de ese espacio, al mismo tiempo...

—Y si no era así el cuento, ¿qué tanto? La Cenicienta, la Bella Durmiente y la Caperucita Roja han estado en boca de todo el mundo y a nadie parece importarles; ¿por qué habríamos de ser tan respetuosos con un gato? —eso era lo que Alen pensaba, mientras continuaba escribiendo con entusiasmo.

El caso es que Alicia ha visto antes a Gato y no le cree lo de la ubicuidad, ¿cómo va a estar en todas partes y al mismo tiempo?, por eso se arriesga a participar en el juego. La cosa es fácil: Alicia se pasea con la vista vendada gritando «¡Marcooo!» y Gato responde «¡Miaaau!» (que en gatuno significa «¡Poloooo!»). A partir del origen del sonido, Alicia debe señalar, con un dedo untado en leche sin lactosa, dónde está Gato; si acierta, Gato le entregará valiosa información para escapar del País de las Maravillas; si se equivoca, deberá acariciar el lomo del felino, lo que no parece gran cosa, excepto porque Alicia es alérgica a los gatos.

Después de repetir muchas veces la experiencia, y habiendo estornudado casi toda la tarde, empieza a ser claro para Alicia que, cada vez que grita «¡Marcooo!», y a pesar de la respuesta de «Polo», se le hace imposible tener noción de la ubicación de su amigo. Sin embargo, cada vez que ella, para ver si acertó, se quita la venda; Gato está en un lugar preciso de la sala. Después de jugar unas cuantas horas, que se le han pasado volando, la niña nota que 15 de cada 100 veces, Gato está cerca de la puerta; 20 de cada 100, al lado de la ventana; 55 de cada 100, colgado de la lámpara; el resto para completar 100, sobre los muebles o sillones, y nunca caminando sobre el piso. Una cosa es segura —piensa la chiquilla—: Gato está en la sala, porque es burlón, pero no tramposo. Alicia concluye que lo más probable es que, la próxima vez, Gato esté colgando de la lámpara; pero también ha entendido que, cada vez que juega, la única forma de saber dónde está Gato, es al final, cuando se quita la venda de los ojos.

Más tarde llega el sombrero loco y por él, Alicia se entera de tres cosas: la primera, que Gato siempre se las arregla para ocupar todo el espacio disponible de la sala, aunque hay lugares con muy poco Gato, como el sofá; otros con nada de Gato, como el piso de parquet; y otros con bastante Gato, como la lámpara (que recién ella se da cuenta; no es de cristales con forma de lágrimas, sino de lágrimas con forma de cristales). Lo segundo que el sombrero le explica, es que cada vez que ella se quita la venda, Gato colapsa en algún sitio; se materializa. La tercera cosa, que le dice al oído, es que Gato también está prisionero y no tiene idea de cómo escapar del País de las Maravillas.

Durante la noche se olvidan de todo, y al otro día, siempre por la tarde, Gato le propone a Alicia jugar a Marco Polo.

—Alen —le preguntó su mamá— ¿Es un punto por cada palabra bien empleada?, ¿verdad?

—Sí, mami —respondió sonriente la chiquilla, mientras con un lápiz rojo, marcaba el título con doble subrayado.

—¿No te parece, cariño, que es una historia algo rara? —le preguntó de nuevo, mientras terminaba una fuente de greda con forma de pez.

—¡No es más rara que un pez con forma de fuente! —le sonrió traviesa, la pequeña.

CONCEPTOS CLAVE: Mecánica Clásica, Teoría de la Relatividad, Teoría atómica y modelos de átomo (de Thompson, de Rutherford, de Bohr), Mecánica Cuántica, Modelo de Schrödinger, Principio de exclusión de Pauli, Principio de incertidumbre de Heisenberg, La antimateria, Las fuerzas de la naturaleza (gravitatoria, débil, electromagnética y fuerza fuerte), Astrofísica, Física Clásica, Dualidad onda-partícula, Función de onda, Antimateria, Teoría estándar de partículas elementales, Materia ordinaria, Fusión nuclear, Quarks, Confinamiento de los quarks.

1

**Ladrillos para edificar el
conocimiento sobre el universo**

EL VIAJE INESPERADO: “DEL MUNDO CLÁSICO AL MUNDO CUÁNTICO”

“Creo que todos deberían tener una visión amplia de cómo funciona el universo y nuestro lugar en él. Es un deseo humano básico. Y también pone nuestras preocupaciones en perspectiva”.

STEPHEN HAWKING

En este capítulo, el propósito es poner en un orden, más o menos cronológico, los principales hitos y dolores de cabeza que permitieron llegar a establecer la teoría atómica, y es que, para explicarnos el Universo, necesitamos entender que existen leyes que le rigen a gran escala; a nivel de galaxias, de estrellas y planetas; y también necesitamos entender lo que sucede a escala atómica y subatómica.

La Astrofísica es una Ciencia que explora el Universo desde las leyes de la Física; sus objetos de estudio son los astros, y el conocimiento lo obtiene analizando la luz que procede de ellos, es decir, de la radiación electromagnética. A partir de la luminosa información que recibe desde el espacio exterior; mide, evalúa, analiza y compara datos obtenidos en observatorios desde la Tierra o datos que son capturados por sondas que son enviadas al espacio a cumplir ese propósito, y aunque parezca increíble, con esos datos, determina parámetros, tales como; temperatura, composición, distancia, tamaño, estructura y/o etapa de evolución en que se encuentra; por ejemplo, una estrella lejana. En el proceso, se van estructurando teorías que permiten explicar el acontecer del Universo.

Nuestro trayecto comenzará cuando aún la Física Clásica dominaba la escena. Lo clásico en Física coincide con lo intuitivo; con la forma en que percibimos cuanto nos rodea. Durante cientos de años predominó la concepción del mundo ofrecida por Tolomeo, que ubicaba la Tierra en el centro del Universo, y donde la Luna, el Sol, los planetas y las estrellas, estaban adheridos a esferas concéntricas que rodeaban la Tierra, como si se tratase de una caja dentro de otra; como muñecas rusas. A partir del Renacimiento, las cosas cambiaron: los nombres clave para seguir el hilo de ese cambio son; Copérnico, Galileo, Kepler y, finalmente, Newton. El movimiento de personas, de todo tipo de vehículos, incluso de los planetas en el Sistema Solar, resulta muy bien descrito por las leyes de Newton, según las cuales el tiempo transcurre separado del espacio, siguiendo una “flecha del tiempo”, tal como lo percibimos. Es un mundo de bajas velocidades y en Física se le llama Mecánica Clásica. En esta visión clásica, el tiempo y el espacio eran considerados absolutos; habiendo comprendido que los planetas se trasladan y giran, parecía necesario referir los movimientos de los astros en relación con “algo” que estuviese en reposo absoluto, por eso se recurrió a la idea de que existía una sustancia inmóvil que lo permeaba todo: el éter.

A fines del siglo XIX, algunos científicos pensaban que ya no había nada nuevo que decir ni hacer en Física, excepto mejorar la precisión de los instrumentos de medida; sin embargo, en las primeras décadas del siglo veinte, surgieron dos teorías sorprendentes: la Teoría de la Relatividad de Einstein y la Teoría de la Mecánica Cuántica. La Teoría de la Relatividad nos lleva a contemplar cuán diferentes pueden ser las cosas de aquello que parece ser de sentido común, cuando suceden a velocidades cercanas a la de la luz y/o en la escala de lo muy masivo: galaxias, estrellas y planetas; el Universo. Cuando se trata de altísimas velocidades, esa teoría es rupturista con lo clásico, sin embargo, en términos prácticos es cuestión de;

bajar la velocidad, volver a la escala humana, y el mundo relativista, gentilmente, nos devuelve a la realidad que conocemos a diario. De hecho, la relatividad también se considera una teoría clásica. La Mecánica Cuántica, en cambio, dirigida a comprender el microcosmos, es de absoluta ruptura con lo clásico. Así las cosas, el mundo que percibimos, quedó en el centro de estas dos visiones de las dimensiones extremas que, después de un siglo de surgimiento, aún no consiguen reconciliarse (asumiendo que alguna vez estuvieron conciliadas)... y aquí estamos, paisanos comunes, disfrutando de los beneficios que genera la Ciencia; que los hay. Entre tanto, los científicos dedicados al tema, han estado absortos en el proceso, como quien deshoja margaritas, entendiendo mucho, poquito, a veces nada; asimilando, trabajando las Matemáticas, debatiendo, dudando; disfrutando del goce intelectual del conocimiento.

CONSTRUYENDO UN MODELO DE ÁTOMO

Siempre ha habido personas que se han preguntado cómo y de qué están hechas las cosas. En este sentido, es conocido que el padre del modelo atomista fue Demócrito, en el siglo V antes de Cristo, que junto con Leucipo, propusieron que la materia estaría formada por partículas pequeñas hasta un punto en que ya no pudieran seguir dividiéndose, por eso las llamaron átomos; proveniente del griego, donde "a= sin" y "tomo= división".

Debo confesar que me gusta mucho la Ciencia y se me dificulta la Filosofía, sin embargo, los griegos llegaron a este modelo atomista a partir de la Filosofía. El único libro de "Filosofía" que he leído completo era de un autor chileno, José Leonidas, que fue publicado por los años sesenta; se llamaba "Los escandalosos amores de los filósofos". Cuando llegó a mis manos, yo era todavía una muchacha; encontrar el amor y el escándalo en una misma literatura, hacía de su lectura una tentación casi

irresistible... Aunque de escandaloso, el libro tenía nada, y a poco andar el autor admitía que era sólo un enganche para el público morboso, he de reconocer que era del todo hilarante. El autor afirmaba que Demócrito era un hombre tímido, que no era partidario de ninguna de las escuelas filosóficas de la época (recordemos que, buscando una explicación a la naturaleza de las cosas, algunos suponían que «todo está hecho de fuego», o bien de aire, o quizá de tierra, o finalmente de agua. La experimentación no formaba parte del desarrollo de aquellas ideas, sino sólo el razonamiento); la idea de Demócrito, respecto de la existencia de átomos, no sólo resultó profunda sino visionaria.

Es muy posible que quien lee estas páginas, ya tiene en mente una noción de átomo que se corresponde con la siguiente imagen: un núcleo que contiene protones y neutrones. Alrededor del núcleo están los orbitales, que son lugares del espacio donde es probable encontrar electrones. Los protones tienen carga eléctrica positiva; los electrones, negativa; y los neutrones, carga eléctrica cero.

Al siguiente escalafón del conocimiento de la teoría atómica se accede por una estrecha escalera, que fue construyéndose peldaño a peldaño, y que recién el año 1926 se formuló en lo conocido como Mecánica Cuántica. Es probable que usted haya accedido también a este nivel, aún así, es muy posible que no lo recuerde. Quizá los principios, a cuyo alero la teoría se construye, le resulten algo parecido a un rompecabezas, pero con las piezas desordenadas y vueltas hacia abajo: la dualidad onda-partícula; el principio de incertidumbre de Heisenberg; el principio de exclusión de Pauli; el principio de construcción... Está lejos de mi intención invitarle al juego de llenar orbitales con electrones, y predecir con esos resultados las propiedades de los átomos. Fragmentar la materia conocida en pequeñas partículas y establecer que se ha de llegar a un límite donde es imposible seguir

dividiendo (en lugar de explicarnos la materia como un continuo), parece hoy una propuesta tan razonable, que asumimos que un escolar, a priori, debería ser capaz de aceptarla. Sin embargo, la Edad Media se encargó de hacer caer el concepto de átomo en la oscuridad de los tiempos, y recién a comienzos del siglo XIX, esta idea brillante fue replanteada por Dalton. Sí, el mismo personaje al que debe su nombre la disfunción visual de confundir ciertos colores, conocido como Daltonismo. En su modelo, John Dalton, involucraba a los átomos y proponía que éstos se enlazaban entre sí para formar moléculas. Indiscutiblemente, Dalton fue un visionario, pero lo cierto es que llegar a establecer que los átomos pueden caracterizarse por un núcleo con carga positiva, compuesto por protones y neutrones, rodeado por la cantidad de electrones necesarios para neutralizar la carga de ese núcleo, fue una tarea ardua que involucró a muchos científicos y casi dos siglos de trabajo.

No sabemos si Thompson era aficionado a la repostería, pero sí sabemos que descubrió los electrones y que el modelo atómico que él propuso recibe el nombre de "modelo de budín de Pasas". Thompson hacía día de sus noches, provocando descargas eléctricas sobre un gas enrarecido atrapado en un botellón (gran volumen con poquísimo gas en su interior), que después fue bautizado con el presentable nombre de "tubo de rayos catódicos". Haciendo uso de imanes, concluyó que las partículas observadas mediante chispazos en una pantalla, se comportaban como si su carga eléctrica fuese negativa. De allí a imaginar a los átomos como una especie de masa que involucraba cargas positivas y negativas, mezcladas como un budín de pasas, no pasó mucho tiempo.

Fue Rutherford quien hizo bombardear una delgada lámina de oro, con partículas positivas (núcleos de helio; conocidos como "partículas alfa"). Observó que la mayoría de las partículas alfa pasaba de largo a través de la lámina, y las visualizaba mediante un detector de

dichas partículas que había del otro lado, pero también registró que algunas de ellas chocaban contra la lámina, como si hubiese un muro. Su conclusión fue, que si la mayoría de las partículas alfa (positivas) pasaba de largo, debía haber mucho espacio vacío, y que cada vez que chocaban y rebotaban, tenían que hacerlo con “puntos” de carga positiva, presentes en la lámina. Esta experiencia le permitió a Rutherford, proponer un modelo atómico tipo planetario, esto es, un núcleo con toda la carga positiva, que era el muro con que chocaban algunas partículas alfa. También debía haber grandes espacios vacíos, por donde atravesaba la mayoría de las partículas alfa, y electrones orbitando en torno al núcleo. Los electrones son indispensables porque el átomo resultante debe ser eléctricamente neutro.

Hasta allí todo bien, excepto para los físicos de ese tiempo, que si bien es cierto aún no habían llegado a un modelo convincente para la estructura atómica, sabían que no era posible que un electrón orbitase en torno a un centro sin radiar energía; que esa energía la iría perdiendo con el propio movimiento y terminaría cayendo sobre el núcleo, destruyéndolo. De hecho, eso es lo que le sucede a un satélite artificial que orbita la Tierra. Dependiendo de la altura, puede suceder que por roce en las capas altas de la atmósfera, pierda energía y termine por caer sobre los océanos, desintegrado en trozos pequeños (aunque no es raro que los noticieros de la televisión abierta, centren su atención en que los restos del satélite caigan sobre nuestras casas, lo cual podría pasar, pero no reporta nada positivo andar imaginando leseras, ¿no cree?). El caso es que el modelo atómico de Rutherford no resistía el análisis. Algo estaba mal. Fue entonces cuando surgió el modelo de Bohr; precursor de la Mecánica Cuántica.

Cuando le comenté a Lutecio (el hijo de mi vecino), sobre el modelo de Bohr y traté de convencerlo de que es realmente distinto al modelo de Rutherford, se me presentaron serias dificultades. No es que Lutecio sea

negado, es que verdaderamente el esquema del átomo de Rutherford es harto parecido al del átomo de Bohr; la diferencia es conceptual, y el problema no surge sólo de que Bohr haya propuesto un concepto nuevo. Lutecio no tiene problemas con lo nuevo, sino con lo raro. El modelo de átomo de Bohr, propuesto en 1913, es la puerta de entrada a la Mecánica Cuántica: a estados cuantizados de la energía. Esto de los estados cuantizados quiere decir que el electrón no cae sobre el núcleo; porque en su trayectoria en torno al núcleo, sólo puede recorrer órbitas permitidas y mientras esté en esas órbitas permitidas, la teoría sostiene (a partir de resultados experimentales) que los electrones no pierden energía, no radian energía, y no lo harán mientras se mantengan en órbitas estables. Se debe aceptar, incluso, que algún electrón puede saltar de una órbita a otra; primero está en una órbita y luego en la siguiente ¡pero nunca lo vas a ver saltando por encima del abismo que las separa!, eso está prohibido, porque así lo confirman las predicciones de la Mecánica Cuántica. Digámoslo derechamente, Lutecio no entiende este asunto porque en términos prácticos es casi inaceptable. No es intuitivo, es ajeno al mundo de la Física Clásica que percibimos.

A la gente de Ciencia también le costó asumir esta nueva manera de modelar la materia. Sin embargo, en un período breve fue mucha la evidencia de dicha cuantización; gran parte de los avances en tecnología asociados a la Medicina, como la resonancia magnética nuclear, el desarrollo del láser, nuevos materiales, tecnología digital, etc., son resultado del acierto con que funcionan las predicciones de la Mecánica Cuántica.

No obstante su osadía y su magnánima contribución al conocimiento, el átomo de Bohr se quedó corto. Le alcanzaba a Bohr para describir el átomo más chico, el de hidrógeno y no mucho más. Los fenómenos aún más complejos, que surgen a medida que aumenta la cantidad de protones en el núcleo, y por tanto aumenta el número

de electrones que externamente neutraliza esa carga, sólo serían explicados por las mentes brillantes de Pauli y Dirac, entre otros.

Cuando asociamos cierta imagen a la estructura que podría tener un átomo, estamos construyendo un modelo conceptual de ese átomo. Si el modelo permite explicar propiedades, corroborar hipótesis y predecir resultados, hablamos de un modelo teórico; pero si las predicciones son diferentes a la realidad, o insuficientes, el modelo teórico deja de ser útil, como sucedió con el modelo de Rutherford, y después con el modelo de Bohr.

Ya por aquel entonces, había sugerido Einstein que la luz podía comportarse no sólo como onda sino también como partícula. A esto se le llama dualidad onda-partícula. Entonces otro científico, un físico y noble francés, Louis de Broglie, audazmente propuso que; teniendo en cuenta que la luz muestra comportamiento dual, esto es, de onda y de partícula, cabía esperar que los electrones, conocidos hasta entonces sólo como "partículas", se comportasen también de forma ondulatoria. Aquello fue comprobado realizando experimentos de difracción de electrones. El fenómeno de difracción, que puede observarse en una cubeta de ondas (que lo experimentan las ondas en el agua, al pasar por una abertura), ya era conocido también para la luz. La luz se difracta debido a su carácter ondulatorio; pues bien, los electrones también lo hacen, vale decir, presentan comportamiento ondulatorio. En 1926, y asimilando el hecho que partículas como los electrones tenían comportamiento ondulatorio, Erwin Schrödinger encontró la forma, un método, de obtener información para cualquier sistema de partículas de propiedades ondulatorias.

Schrödinger propuso un modelo a partir de un aparataje matemático altamente abstracto (que se llama operador hamiltoniano), que permite obtener una descripción del átomo como una "función de onda". El átomo de Bohr brindaba una imagen, fácil de visualizar con un dibujo; en

cambio, el modelo de átomo de Schrödinger es complejo de asimilar en términos de una imagen, y al comienzo, también fue difícil de interpretar para los científicos. Fue Max Born quien ayudó a comprender su significado; Born dio una interpretación estadística a la función de onda elevada al cuadrado: la asoció a la probabilidad de ubicar la posición de la partícula (el electrón en el átomo) en una región del espacio, a la que se le llamó "orbital".

Seguramente, alguna vez en su vida, ha tenido usted (o tendrá) un encuentro cercano con los números cuánticos; para allá vamos de nuevo, porque resolver la ecuación de Schrödinger, permite encontrar funciones de onda (tome nota del plural) que describen el comportamiento del electrón en el átomo; no se encuentra una única solución, sino un conjunto de soluciones, que pueden ser caracterizadas por tres números enteros (n , l , m) que se conocen como "números cuánticos", cuya fama casi no requiere presentación, y que describen el conjunto de orbitales donde es probable encontrar electrones. El asunto, que parece rarísimo, al final es sencillo de manejar, ya que se describe al átomo como si fuese un edificio de departamentos, que serían los orbitales. Hay siete niveles: n se refiere a la energía (al nivel) del orbital; l describe la forma del orbital; m , la orientación. El cuarto número cuántico (el de spin) fue propuesto por Wolfgang Pauli, y para asimilar su significado, es decir, para poder imaginarlo desde nuestra mirada clásica, se dice que corresponde al giro del electrón, en un sentido o en otro.

La Mecánica Cuántica establece que no todas las variables de un sistema pueden conocerse con absoluta precisión. A partir de la ecuación de Schrödinger puede obtenerse la función de onda que describe el sistema y su energía total, pero si se requiere evaluar otras propiedades, como la velocidad de la partícula o su posición en un instante dado, surgen inconvenientes; todo lo que se puede hacer es obtener información estadística, sujeta a las probabilidades de las que hablaba Born.

Ese es el siguiente peldaño en la escalera de lo raro. Desde la mirada probabilística, al repetir una experiencia, no es posible predecir cuál será el resultado de una medición, a lo más, podemos llegar a saber la probabilidad de obtener el mismo resultado.

Hubo muchos físicos contentos con el nuevo planteamiento de Born, pero no Schrödinger. Él había abierto la puerta a las funciones de onda, pero no le gustaba esta visión probabilística, le parecía poco serio suponer que un resultado dependiese del azar; mostró abiertamente que le molestaba esta idea de concebir a los electrones como ludópatas y a los átomos como un casino.

Por si no fuesen suficientes las rarezas de esta nueva teoría, en 1927, el físico alemán, Werner Heisenberg, enunció el principio de incertidumbre. De acuerdo a él, no puede conocerse con precisión, y en forma simultánea, la posición y la velocidad de una partícula. Si se conoce con precisión la velocidad, se pierde información sobre la posición; si se sabe con precisión dónde está la partícula, se pierde información sobre su velocidad. Para profundizar en la comprensión del principio de incertidumbre debemos tener en cuenta que la partícula tiene asociada una onda; al iluminarla para interactuar con ella, el observador la perturba, y la partícula adquirirá una velocidad diferente a la original. Como resultado, perdemos la información original que queríamos obtener y este aspecto no tiene relación con mejorar los instrumentos de medición. Analizado más a fondo, el principio de incertidumbre se presenta como una condición propia de la partícula, ya que si se intentase frenarla para que quedase fija en una posición (con el objeto de poder medirla), su naturaleza ondulatoria la haría vibrar desenfrenadamente, de modo que su velocidad quedaría altamente indeterminada. Este concepto puede parecernos muy extraño, pero puede ayudarnos a su comprensión una analogía del acontecer humano; si interactuamos con una persona

con el propósito de evaluarla, esa persona alterará su comportamiento, tratará de parecer más hábil, o bien se pondrá nerviosa y lucirá más torpe de lo que comúnmente es, de modo que el observador será, en parte, "responsable" de la conducta observada.

El modelo atómico actual establece que en el núcleo hay cierta cantidad de protones y una cantidad similar de neutrones. Toda la carga positiva del núcleo se debe a los protones, pero la masa se debe a la suma de protones y neutrones, que además ayudan a estabilizar al núcleo. Cada electrón tiene la misma carga que un protón, pero de signo opuesto. La masa del electrón es 1800 veces menor que la del protón. Sin embargo, hasta el año 1932, el modelo atómico aún estaba complicado. Suponían que la masa se debía sólo a los protones dentro del núcleo. Desconocían la existencia de los neutrones. Pero los protones tienen carga eléctrica. De ser los protones responsables de toda la masa, también tendrían que serlo de toda la carga, y al ser los protones positivos, la carga medida en los núcleos sería el doble de lo que realmente se mide. Parecía conveniente suponer que podía haber electrones (cuya masa es ínfima) dentro del núcleo, para compensar el exceso de carga. Sin embargo, el tamaño del núcleo atómico es muchísimo menor que el átomo (unas 100.000 veces menor), y a partir del principio de incertidumbre, quedaba claro que no es posible confinar un electrón dentro de un núcleo atómico (sería como tratar de frenarlo). El broche de oro para resolver este rompecabezas atómico vendría de la mano de un británico.

El descubrimiento del neutrón se debe a James Chadwick. Él realizó experimentos bombardeando una lámina de berilio con partículas alfa (los famosos núcleos de helio positivos). El resultado fue que se desprendían partículas de alta energía. Luego concluyeron que esas partículas tenían una masa similar al protón, pero su carga eléctrica era nula; por eso

les llamaron neutrones. Chadwick recibió por ello, el Premio Nobel en 1935. A la par de contribuir a formular un modelo atómico más consistente, el descubrimiento de los neutrones allanó el camino hacia la fisión nuclear. Hasta ese momento era común bombardear átomos con partículas alfa, pero siendo de carga positiva, ellas eran repelidas al chocar con los núcleos de sus átomos objetivo; en cambio, los neutrones (sin carga) podían “dar en el blanco” y provocar la fisión nuclear, es decir, la división de los átomos, como sucede en las bombas atómicas o como sucede también en las centrales nucleares. En estas últimas, se realiza la fisión nuclear de núcleos pesados, que al ser bombardeados por neutrones se desintegran, generando núcleos más livianos y una inmensa cantidad de energía, por lo que deben mantenerse bajo riguroso control en un estanque con agua. En el proceso, la energía liberada en la fisión, calienta el agua del estanque que contiene al reactor, produciendo vapor que mueve una turbina, y eso permite generar energía eléctrica.

Como se ha visto, la interpretación de la Mecánica Cuántica no ha sido un terreno llano para todos los físicos por igual; en sus inicios tuvo algunos detractores que eran verdaderos genios. De un lado, estuvieron personajes de la talla de Bohr, Born, Heisenberg, Pauli, Dirac y más; cuya interpretación es conocida como “Escuela de Copenhague”. De acuerdo con ella, el principio de incertidumbre es inherente al proceso de medición; el observador, para realizar la medición, debe perturbar al sistema observado; por tanto, observador y observado son inseparables. Los resultados (probabilísticos) de la Mecánica Cuántica, son “todo” lo que podemos conocer de los sistemas.

Así lo declaraba Heisenberg:

“la ciencia es el estudio de nuestras observaciones del mundo, y no del mundo mismo”.

Y según Pauli:

“El concepto de objeto material, de constitución y naturaleza independientes del observador, es ajeno a la física moderna”.

Por otro lado, hubo quienes mantuvieron una constante polémica respecto del significado de la Mecánica Cuántica, entre ellos, el propio Einstein:

“El físico debe postular en su ciencia que está estudiando un mundo que el mismo no ha hecho y el cual estaría presente, esencialmente idéntico, si no estuviéramos aquí”.

De similar postura a la de Einstein, eran de Broglie y Schrödinger. La interpretación de Copenhague de la teoría cuántica implicaba que una partícula puede estar en más de un estado o en más de un sitio al mismo tiempo, y que al interactuar con un observador, la partícula se materializa en un solo estado, respondiendo a cierta probabilidad. A Einstein, aquello le resultaba inaceptable, por eso fue que declaró «Dios no juega a los dados», y aunque la carta escrita en 1926, en que hacía tal afirmación estaba dirigida a Max Born, la respuesta se la dio Niels Bohr: «Einstein, no le digas a Dios lo que tiene que hacer». Sin embargo, Schrödinger tampoco podía aceptarlo; por eso, para mostrar sus objeciones a la interpretación probabilística y al principio de incertidumbre, planteó la paradoja conocida como “El gato de Schrödinger”: donde se introduce un gato, en una caja que contiene un átomo radioactivo, un detector de radiación y una ampolla de cianuro; si el átomo emite una partícula radiactiva, el detector hace que la ampolla de cianuro se rompa y caiga en un cubo de ácido, el cianuro se esparcirá en la caja como vapores tóxicos de ácido cianhídrico y el gatito morirá; si no se emite radiación, la ampolla no se rompe, y el gato estará vivo. Existe un 50%

de probabilidades de encontrar al gato vivo o muerto, pero solo lo sabremos una vez abierta la caja. Mientras tanto, (si se acepta la interpretación de Copenhague) **el gato estaría vivo y muerto al mismo tiempo**. La paradoja de la paradoja es que, con los años, el gato de Schrödinger sigue vivo, y es casi una tarjeta de presentación de la mirada contraintuitiva de la Mecánica Cuántica; es decir, el gato se pasó al bando contrario. Quizá Schrödinger debió haber depositado su confianza en una gata.

Con gatas, gatos u otros animales, gran parte del maravilloso desarrollo tecnológico y de la forma de vida que llevamos, se lo debemos a las predicciones acertadas de la Mecánica Cuántica, sin embargo, Schrödinger llegó a decir al respecto «No me gusta y siento haber tenido que ver alguna vez con ello».

Señalado lo anterior, podemos seguir añadiendo la complejidad que requiere la estructura atómica. La cantidad de protones es lo que identifica a un átomo; por ejemplo, cualquier átomo con 6 protones en su núcleo es carbono, y se acabó la discusión. Ahora bien, la cantidad de neutrones puede variar; entonces decimos que se trata de átomos de diferente masa, de un mismo elemento, es decir, son isótopos.

Veamos el caso del carbono; donde p =protones y n =neutrones.

Como el carbono tiene 6 protones; si un isótopo del carbono tiene 6 neutrones, se trata de carbono 12 ($6n + 6p = 12$ nucleones). Normalmente se escribe el símbolo del elemento, antecedido por el número que corresponde al isótopo (suma de protones y neutrones), escrito como superíndice; por ejemplo ^{12}C (que es el isótopo más abundante del carbono). Si tiene 7 neutrones será ^{13}C (porque sigue teniendo 6 protones, pero como tiene 7 neutrones, la suma da 13 nucleones).

Con 8 neutrones será ^{14}C . Este isótopo es dueño de su propia fama, porque permite datar la fecha de muerte de un ser vivo; hasta 50.000 años atrás.

En el caso específico del elemento helio, decimos:

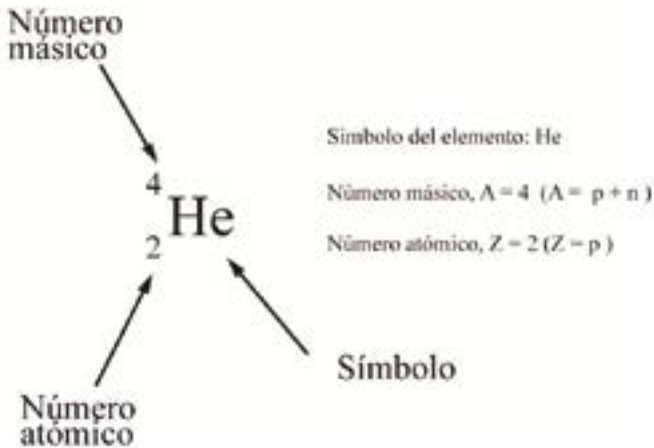


Figura N° 1

Como el número atómico es lo mismo que “ $p =$ número de protones”, e identifica al elemento, es redundante escribirlo, ya que el símbolo también identifica al elemento.

Protones y neutrones tienen una masa muy similar, pero no exactamente la misma. Ambos están formados de partículas aún más pequeñas; los “quarks”. Los quarks más comunes que forman la materia que conocemos, la materia ordinaria, son llamados *up* y *down*, y la composición en quarks de un protón, no es la misma que la de un neutrón. El núcleo, comparado con el átomo completo, es sumamente pequeño y su carga será tan positiva como la cantidad de protones que contenga. Las cargas positivas en el núcleo experimentan entre ellas repulsión electromagnética, pero se soportan gracias a la fuerza nuclear fuerte; los neutrones también contribuyen a estabilizar al núcleo.

Más pequeño que un átomo

Si usted se pregunta si los electrones pueden dividirse, la respuesta hasta ahora válida es ¡no! Es tan ínfimo su tamaño que se los considera cargas puntuales. Y los nucleones, esto es, protones y neutrones, ¿pueden dividirse? Hasta donde se sabe, sí pueden dividirse. De aquello da cuenta la teoría estándar de partículas elementales, heredera natural de la Mecánica Cuántica, que además de la materia ordinaria, estudia partículas presentes en rayos cósmicos.

Protones y neutrones están compuestos de partículas llamadas quarks. El nombre "quark" no tiene una raíz científica, sino literaria. Lo propuso en los años 60, el físico Murray Gell-Mann, inspirado en la frase de un libro de James Joyce llamado "Finnegans wake"; «Tres quarks para Muster Mark», esa era la frase. Según Gell-Mann, otro prestigioso físico amigo suyo (Richard Feynman), quería llamar a tales partículas con el apodo de "partones". El nombre "quarks", me parece un absoluto capricho, pero a todas luces, es mejor que "partones", ¿no cree?

Los quarks son una familia de 6 partículas. Sus nombres son: *up* y *down*, *top* y *bottom*, *strange* y *charisme*. Los científicos pueden bautizar sus partículas con nombres sumamente peculiares cuando están inspirados... De todos ellos, sólo los dos primeros quarks participan en la formación de neutrones y protones; que son llamados materia ordinaria (todo lo conocido, incluidos nosotros, es materia ordinaria). Los otros quarks, constituyen partículas de laboratorios de alta energía (colisionadores) o de los rayos cósmicos.

Los electrones también tienen familia; pertenecen a la familia de los "leptones" (que significa liviano). Sus nombres también son simpáticos: está el electrón y su neutrino electrónico; el muon y su neutrino muónico; y el tauón (éste suena un poco feo) y su neutrino tauónico. Sólo el primero de ellos (el electrón) forma parte de la

materia ordinaria; él y su neutrino. Se da el caso que los neutrinos son demasiado pequeños; también se da el caso que cada átomo tiene gran espacio vacío. Como veremos en el capítulo IV; en el Sol constantemente se produce fusión nuclear, y como consecuencia de esa reacción, se originan neutrinos que vienen hacia la Tierra, atraviesan nuestros cuerpos, pasan a través de nuestro planeta y continúan su viaje. Pasan sin tocarnos, por las grandes extensiones de espacio vacío que hay en los átomos de nuestro cuerpo; son millones y millones de neutrinos cada día. Eventualmente alguno de esos neutrinos podría tocarnos, pero sería raro... ¡Hay tanto espacio vacío por donde atravesar! Y es que, si un átomo creciera proporcionalmente hasta completar una cancha de fútbol, el núcleo sería el equivalente a un granito de arena de un milímetro en el centro de la cancha. Sería un interesante ejercicio, y también sumamente personal, determinar qué volumen ocuparía nuestro cuerpo si estuviese todo compactado, y descubrir cuánto espacio vacío hay contenido en cada uno de nosotros.

En Japón está instalado un observatorio de neutrinos; se llama Kamiokande (sugiero buscar en Google). Es una infraestructura impresionante, hermosa, a la espera que por estadística, uno que otro neutrino choque con la materia (agua muy pura, contenida en un enorme estanque construido bajo tierra). Ese es el observatorio. La Ciencia encuentra muchas maneras de observar, ¿no cree?

En resumen, hablar de materia ordinaria (nosotros, la Tierra, las estrellas y sus componentes conocidos) es hablar de protones, neutrones, electrones y su neutrino; las partículas exóticas formadas por los otros quarks (o los otros leptones), en este ámbito de conversación, son sólo una curiosidad que basta con mencionarla.

La protagonista de este libro es la materia ordinaria, y donde hay una protagonista, la materia, algo habrá que decir sobre la antagonista. Lo primero que diré es que no es una ficción; la antimateria existe.

UN MUNDO PARALELO

Cuando era niña, disfrutar de los adelantos tecnológicos casi se reducía a reunirse en familia después de tomar once y dedicarle un par de horas a las tardes de cine. Allí, frente a un televisor en blanco y negro, mis hermanos y yo, contemplábamos con abundante ironía y generosas risotadas las películas de ciencia ficción que presentaban con periodicidad casi religiosa. Hablo de los años setenta, por lo tanto, las fuentes de inspiración de los guiones, bien llegaban a los años cincuenta y poco más allá. Así fue como conocí a “La Carcaña”; un ave descomunal, nacida del rescate de un huevo prehistórico, que cuando creció, se puso malvada, dañina; entonces, fue arrojada a las profundidades del océano Ártico. La película planteaba un problema (un ave de tamaño colosal es un gran problema, incluso si fuese “buena onda”), pero se hacía cargo de resolverlo. Podía entonces, ir a dormir tranquila porque el futuro de la humanidad estaba garantizado. Eso no sucedía, cuando le tocaba a “La Burbuja” rellenar el horario vespertino. La Burbuja era una gran masa transparente y gelatinosa que se filtraba entre las rendijas, devorando todo a su paso, y convirtiendo aquello que tocaba en burbuja... al final de la historia parecía que lograban exterminarla, pero no era cierto, quedaba en el Polo Norte una gota de “Burbuja”, ansiosa de volver a renacer. Después de eso, era casi imposible conciliar el sueño. Por cierto, no faltaban a esa cita con el cine del recuerdo, las películas de viajes interestelares a bordo de cohetes espaciales de presupuesto minimalista.

Al buen humor de mis hermanos le sobraban argumentos. En esas naves de cartón piedra, en lugar de encontrar computadores o tableros de comando, ostentaban cajoneras fabricadas en madera labrada y puertas decoradas con artísticas molduras por entero inapropiadas, de modo que nos reíamos por todo; nos reíamos porque dentro del rudimentario cohete no tendría

que haber gravedad y la había; nos reíamos porque el cohete avanzaba horizontalmente hacia adelante, pero expulsaba los gases de combustión hacia arriba (en lugar de hacia atrás); y nos reíamos porque los científicos que tripulaban la nave, iban en búsqueda de la "antimateria". Reíamos porque pensábamos que la antimateria no existía.

Fue Paul Dirac quien predijo la existencia de la antimateria. Señaló que debía existir una antipartícula del electrón; un electrón, pero de carga opuesta. La conjetura de la antimateria surgió como consecuencia de explicar el movimiento del electrón, a velocidades cercanas a las de la luz, mediante su teoría cuántica relativista del electrón.

Para quienes la disfrutan, la Matemática tiene un marcado símil con aquellos breves poemas japoneses llamados haiku; ambos capturan belleza y la contienen en un par de palabras, o en una ecuación. Dirac pensaba que el Universo era elegante y que debía ser descrito por ecuaciones no despojadas de belleza. Fue así como publicó su ecuación relativista para el electrón en 1928, pero a la par de ser considerada de elegancia bella y sencilla, Dirac debía admitir que sus resultados eran también extraños, porque predecían la existencia de antielectrones. En un principio, el propio Dirac pensó que las partículas positivas que surgían de sus ecuaciones, eran los ya conocidos protones; pero otros científicos le hicieron ver la enorme diferencia de masa entre protones y electrones. Si la referida partícula era igual al electrón, pero opuesta; no podía tratarse del protón.

Paul Dirac era conocido como hombre parco de palabras, pero de seguro no fue su timidez lo que le retuvo a difundir a la comunidad científica, un descubrimiento teórico que a él mismo le parecía poco creíble. Entre 1928 y 1932 estuvo debatiéndose ante la duda de cuál sería la naturaleza exacta de la partícula predicha. En 1932 se decidió a formular abiertamente lo que sus ecuaciones le indicaban, esto es; que cabía conjeturar la existencia de la antimateria. Ese mismo año (1932), Carl

Anderson, un científico del Instituto Tecnológico de California, estudiando rayos cósmicos, logró fotografiar, en un equipamiento que se llama “cámara de niebla”, unas partículas con las mismas características de los electrones, exceptuando la curva de la figura descrita en su movimiento (que daba cuenta de su carga eléctrica) que era opuesta a la de los electrones. Se había topado con antielectrones, que fueron llamados “positrones”. En 1933, Dirac y Schrödinger compartieron el Premio Nobel de Física por sus contribuciones al desarrollo de la teoría atómica. En 1936, Anderson obtuvo el Premio Nobel por su descubrimiento del positrón.

Pasaron años antes de descubrir otras partículas de antimateria, ya que para lograrlo se requieren condiciones sólo posibles en un laboratorio de física de partículas. Sin embargo, si una antipartícula entra en contacto con la partícula de materia que es su opuesta, se produce una aniquilación, es decir, una colisión que las hace desaparecer a ambas, generando fotones muy energéticos.

A pesar de las dificultades que supone la aniquilación, se ha conseguido producir diversidad de antipartículas. Mediante alto vacío y fuertes campos magnéticos, se las puede aislar por breve tiempo de la materia. En el CERN (Centro Europeo de Investigación Nuclear) se ha logrado producir anti-hidrógeno durante el tiempo suficiente que ha permitido su estudio. Sin embargo, la producción masiva de antimateria tendría la complicación de que al momento de entrar en contacto con la materia, se aniquilarían mutuamente, generando tanta energía que la dificultad de la siguiente etapa estibaría en la liberación controlada de esa energía para su utilización. Si los tripulantes de la película del cohete con cajoneras hubiesen encontrado la antimateria, la historia aquella no habría tenido un final feliz; sino abrupto. Tal vez los guionistas, después de todo, sí lo sabían.

Lo verdaderamente fascinante, y a la vez perturbador, de la existencia de la antimateria, es que le obliga a uno a

recorrer el pedregoso camino de las preguntas (aunque a menudo los científicos piensan que el camino de las preguntas es maravilloso, y que lo pedregoso está en las respuestas). Pues bien, la respuesta que tenemos hasta ahora es que en nuestro Universo, la batalla la lleva ganada la materia, y desde el principio.

Así como la aniquilación produce fotones, un fotón de suficiente energía puede conducir a la generación de pares, es decir, a la formación de partícula y antipartícula, lo que normalmente viene seguido del proceso inverso, y se produce la aniquilación del par formado. El Big Bang (como veremos en el capítulo III) propició esas condiciones e hizo surgir materia y antimateria, pero muchas de esas partículas recién nacidas se aniquilaron entre ellas. Pues bien, parte de la antimateria que surgió durante el Big Bang fue aniquilada por la materia generada en el mismo proceso, pero si toda la materia conocida sobrevivió, la pregunta lógica es ¿qué le pasó al resto de la antimateria?, ¿se hizo a un lado?, ¿en algún momento se produjo más materia que antimateria? Porque de no ser ese el caso, es inevitable preguntarse ¿dónde está la antimateria? Es posible que haya tomado un rumbo, ¿distinto?, ¿superpuesto al nuestro? De ser así, ¿existirá un mundo paralelo al nuestro?, ¿un mundo igual, pero contrario?, ¿un mundo donde el full de ases lo haya tenido desde el principio, la antimateria?, ¿un mundo donde una anti-Madonna, canta anti-canciones, a una anti-chica de un mundo anti-material?

LAS FUERZAS DE LA NATURALEZA

Alen, nuestra chiquilla preguntona, tiene importantes dudas acerca de las fuerzas que mantienen unida la materia en la naturaleza. De la única fuerza que ella ha escuchado hablar es de la fuerza de gravedad, por eso le preguntó a Adulto por la forma del agua y Adulto le recitó de corrido que «Un líquido tiene la forma del recipiente

que lo contiene». Alen ya había escuchado esto antes y pensaba que eso de “la forma del recipiente que lo contiene” era culpa de la gravedad que hace llover de arriba para abajo y no al revés, y se preguntaba «Si no hubiese gravedad, ¿qué forma tendría el agua? Si el agua sigue junta, aún sin gravedad —se decía pensativa la chiquilla—, la pregunta sería ¿qué la mantiene unida? —entonces repitió la pregunta, y añadió— Y si no hubiese gravedad, ¿cuál sería la forma del agua?». Adulto sintió un profundo deseo de mandar a la niña a freír espárragos, pero para satisfacer sus dudas buscó en internet la película “La forma del agua”, y la mandó a verla.

Para disipar esa duda dedicaremos algunos párrafos a describir las otras fuerzas que se conocen en la naturaleza. También tenemos una razón adicional, y es que en los otros capítulos de este libro, ocasionalmente, esas fuerzas se mencionan para explicar algunos fenómenos, por lo tanto, algo debemos saber sobre ellas antes de utilizarlas sin más.

Actualmente la Ciencia puede evidenciar cuatro fuerzas en la naturaleza; tres de estas fuerzas han sido formuladas en forma consistente en una teoría mencionada previamente (el modelo estándar de partículas, que es una teoría cuántica), y la cuarta fuerza corresponde a la gravedad, que es una teoría clásica. Hasta la fecha, aunque hay variados intentos para formular una teoría cuántica de la gravedad, no ha habido éxito (encontrar tal teoría cumpliría con el objetivo de explicar fenómenos de grandes masas y energía contenidos en pequeños espacios, como debió ser el Big Bang). Cada una de estas fuerzas tiene asociada una forma de manifestarse en el espacio y en el tiempo, una región, que está bajo la influencia de esa fuerza, a la que se le llama “campo”, y dicha fuerza puede actuar sobre la materia dentro de esa región. Desde el punto de vista intuitivo, el campo gravitatorio es el más evidente de todos.

De modo que existen en la naturaleza, cuatro fuerzas asociadas a cuatro campos. Adicionalmente, a cada una

de las interacciones, la teoría le atribuye una partícula (virtual), que es la mediadora de esa fuerza.

Las cuatro fuerzas que la Ciencia ha ido descubriendo en la naturaleza a través de la Mecánica Cuántica; su alcance, su intensidad relativa, otorgando arbitrariamente el valor "1" a la interacción gravitacional, y la partícula portadora o mediadora de cada fuerza, están resumidas en la siguiente tabla.

Tipo de fuerza	Alcance	Intensidad relativa (comparada con la fuerza de gravedad)	Partícula mediadora o tipo de bosón
De gravedad	Infinito	1	Gravitón (conjetura)
Fuerza nuclear débil	1×10^{-18} m	1×10^{15}	Bosón W, Z
Fuerza electromagnética	Infinito	1×10^{38}	Fotón
Fuerza nuclear fuerte	1×10^{-15} m	1×10^{40}	Gluón

Tabla N° 1

Esta tabla es sólo comparativa. Para explicarla nos referiremos a las fuerzas de los extremos. La tabla indica que, aunque tiene alcance infinito, la fuerza de gravedad es la más débil de todas (a medida que dos objetos se alejan, la magnitud de la fuerza gravitatoria entre ellos disminuye de una manera análoga a la disminución del brillo de una fuente luminosa, a medida que nos alejamos de ella). En cambio, la fuerza que une a las partículas dentro de los núcleos de los átomos, fuerza nuclear fuerte, tiene un alcance muy pequeño, del tamaño de un protón, del orden de 1×10^{-15} metros, sin embargo, es 10.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 veces más poderosa que la fuerza gravitatoria. Cada una de estas fuerzas posee un ámbito donde su acción se hace relevante.

La fuerza de gravedad (o fuerza gravitatoria) determina las interacciones que se producen a nivel de Sistema Solar, galaxias, Universo, y ciertamente, también permite que no andemos flotando por ahí (pero aquí no se trata de andar buscando protagonismo).

La fuerza nuclear débil interviene en el decaimiento de núcleos radiactivos. Por ejemplo, en el decaimiento radiactivo del ^{14}C , que se usa para determinar la edad de osamentas, madera petrificada y objetos antiguos de origen orgánico.

La fuerza nuclear fuerte es la que permite explicar la estabilidad de los núcleos atómicos.

La fuerza electromagnética está detrás de la estabilidad del átomo en su totalidad, además, determina la capacidad de los átomos de enlazarse entre sí y el tipo de enlaces que ellos pueden formar, según se trate de átomos iguales, parecidos o muy diferentes (enlace metálico, iónico, covalente, etc.); por tanto, la fuerza electromagnética es la causa última de las propiedades de la materia, tales como densidad, flexibilidad, dureza. Está presente cuando nos tomamos de las manos, también cuando experimentamos la suavidad del cabello de un niño, o la fuerza de roce que impide desplazar un mueble. En consecuencia, se dice que es la fuerza residual que está detrás de esas otras manifestaciones de fuerza más evidentes.

La fuerza de gravedad que se produce en virtud de la masa de los objetos, es una fuerza siempre atractiva y es, lejos, la fuerza de la naturaleza que asumimos de manera más *natural*. Tanto si se nos cae un lápiz, como si se nos caen las mejillas, la papada, la barriga y otras partes interesantes del cuerpo, es común culpar de ello, no a la edad, sino a la fuerza de gravedad.

Por analogía con las otras fuerzas que se conocen, a las cuales se les ha atribuido una partícula mediadora de dicha fuerza, se ha llegado a considerar que “debería haber” una partícula que haga el trabajo de mediadora

en el área de la fuerza gravitatoria. “Debería”. Lo cierto es que hasta ahora, no se ha desarrollado ninguna teoría cuántica relacionada con la fuerza gravitatoria, de modo que difícilmente podría haber evidencias de la existencia de la partícula “gravitón”. Hasta el momento es una mera conjetura, sin embargo, es importante tener en cuenta que una teoría cuántica de la gravedad resulta necesaria para comprender situaciones clave del Universo; en las que la masa se encuentra altamente compactada, tales como los “agujeros negros” o el propio Big Bang.

La fuerza nuclear débil está asociada a una desintegración nuclear natural, conocida como “decaimiento beta”. Su alcance está en el orden de la milésima parte de un protón. Decaimiento beta es una forma de decir que; por ejemplo, un neutrón dentro del núcleo, se siente incómodo, inestable y decide transformarse en un protón. Para que la naturaleza siga siendo eléctricamente neutra, en la transformación se emite un electrón (que antes no estaba); un electrón que es producto del decaimiento que experimentó el neutrón. Cuando eso sucede, y para distinguirlos de los electrones externos al núcleo, a estos electrones que salen expulsados desde dentro del núcleo, se les llama “partículas beta”. En el proceso también se genera un antineutrino electrónico; partícula pequeñísima, antipartícula del neutrino. Los neutrinos habían sido predichos por Pauli, mucho antes de ser descubiertos. Pauli era tan brillante que, para dicho experimento en que parecía que una cierta cantidad de energía se había perdido (cosa terrible, ya que es ley de la naturaleza que la energía no se pierde, sólo se transforma, pero jamás se pierde), en lugar de suponer que el experimento estaba mal hecho o no tenía sentido, propuso la existencia de estas partículas que fueron llamadas “neutrinos”, ¡que vinieron a ser detectadas casi tres décadas más tarde!

La fuerza electromagnética es consecuencia de la naturaleza eléctrica de la materia. Como se dijo,

está asociada a formación de enlaces y también a su destrucción, a cambios físicos entre átomos y moléculas, lo que finalmente repercute en que existan las piedras, que los bosques tengan árboles y que los ríos lleven refrescante agua líquida. En este punto nos detendremos para aclararle las dudas a Alen, respecto de la forma del agua.

Las fuerzas presentes entre las moléculas son de naturaleza electromagnética. Efectivamente, en presencia de la fuerza gravitatoria, cualquier líquido toma la forma del recipiente que lo contiene; pero en ausencia de ella, un líquido tendería a tomar la forma de una esfera, porque de ese modo, las interacciones con el medio que le rodea, por ejemplo el aire, serían las mismas en todas las direcciones. En cuanto a las fuerzas que mantienen unidas las moléculas de agua, resulta que cada molécula de H_2O puede tender puentes entre átomos de hidrógeno de una molécula, con átomos de oxígeno de otra molécula; cada hidrógeno que ya está enlazado formando cierta molécula de agua, le hace "ojitos" al oxígeno de otra molécula porque lo encuentra "muy interesante". Estos puentes de hidrógeno también pueden formarse en otros líquidos, siempre que presenten en su estructura, átomos de nitrógeno, oxígeno o flúor.

Debido a los puentes de hidrógeno, el agua es líquida en un rango de temperatura tal, que permite tomar una ducha tibia para despertarnos, disfrutar de un café bien caliente en las mañanas neblinosas de otoño o saciar la sed con un refrescante vaso de agua fría en un día de enero a las 4 de la tarde. ¡Tres urras por los puentes de hidrógeno! Y por la fuerza electromagnética, desde luego.

Se asume que en todas estas fuerzas se cuenta con la participación de partículas mediadoras de interacciones. Esto en particular será explicado para la fuerza fuerte. Sabemos que dos cuerpos con carga eléctrica del mismo signo se repelen. La fórmula matemática que describe la repulsión de dos cargas puntuales (o atracción, si se trata

de cargas distintas) es la ley de Coulomb. De acuerdo a ella, basta con quitar una de las cargas para que la repulsión desaparezca; si ponemos la carga de nuevo, la ley de Coulomb nos dice que la repulsión vuelve a aparecer de inmediato, como si hubiese una acción a distancia entre las cargas. La teoría estándar de partículas corrige esta aparente acción a distancia.

Hay dos condiciones que impiden una acción a distancia: primero, la causa debe ocurrir antes que el efecto, esto se llama principio de causalidad; segundo (como veremos en el capítulo III), la teoría de la Relatividad Especial dice que nada puede ocurrir a una velocidad más rápida que la de la luz, es decir, cualquier interacción entre partículas ha de tardar, a lo menos, el tiempo que toma la luz en recorrer la separación entre las partículas. Debido a que no existe la acción a distancia, la teoría estándar incluye partículas virtuales mediadoras de interacciones que permiten la comunicación; ya sea que se trate del alcance infinito de la fuerza electromagnética o de la interacción entre dos protones dentro del núcleo de un átomo, en ambas situaciones debe haber un mediador de tal interacción.

La teoría estándar de partículas elementales establece en términos cuánticos la existencia de "bosones"; todas las partículas mediadoras de interacciones son bosones. Esta última denominación deriva de un nombre genérico en homenaje a un físico indio que trabajó con Einstein en describir el comportamiento de las mismas; su nombre era Satyendra Nath Bose. Es afortunado que los llamasen bosones y no satyendrones, ¿no le parece?

Dependiendo del área donde ejercen sus labores, como se observa en la Tabla N° 1, los bosones pueden llamarse gluones, fotones, o derechamente bosones W^+ , W^- y Z^0 .

He aquí un alcance; para sorpresa de los investigadores en esta área, desde los años 60 en adelante, fueron surgiendo nuevas partículas rarísimas que nadie se esperaba, a muchas de ellas (que no son comunes) las han llamado "exóticas", sin embargo, exóticas u ordinarias, a

cada una de ellas, sus descubridores (expertos en cuántica) han debido bautizarlas. De seguro, el día que surgieron los bosones asociados al decaimiento radiactivo, no estaban ellos muy inspirados: ¿bosón W?, ¿bosón Z? Cierto es que en inglés la palabra “débil” comienza con w (weak); argumento débil, para una interacción débil.

Las partículas mediadoras de interacciones son virtuales, por tanto, los fotones señalados en esta sección son virtuales. La teoría predice su existencia y todo funciona como si estuviesen presentes muy brevemente. De acuerdo al principio de incertidumbre, no es posible detectarlos. Ahora bien, estos fotones virtuales existen aunque no puedan detectarse; pero los fotones reales existen y sí pueden detectarse. Si lo duda, encienda la luz o salga a tomar solcito.

Haré uso de una situación ilustrativa para asimilar el rol de los bosones como partículas mediadoras en sus lugares de trabajo: imagine usted un equipo de jugadores de básquetbol, Einsteinio está en las graderías y observa cómo ellos se hacen pases unos a otros; el jugador que lanza, imprime impulso a la pelota y, mediante ella, transfiere ese impulso al jugador que recibe el pase, sin embargo, quien recibe el balón es tan hábil como quien lo ha lanzado, y Einsteinio no alcanza a percibir que junto con la pelota, ha habido transferencia de interacción mecánica entre los jugadores. En el segundo tiempo hay cambios; cambian el parquet del piso de la cancha por una pista de hielo, les ponen patines a los jugadores y el juego comienza. Pues bien, en la pista de hielo (con mínimo roce), el impulso del lanzamiento de la pelota entre jugadores se expresa notoriamente; el jugador que lanza, retrocede en el proceso de lanzarla, y el que recibe el impulso transmitido por la mediadora, perdón, por la pelota, lo empuja en esa dirección. El impulso que hizo el jugador que lanzó, es transmitido por la pelota, que es la mediadora de la interacción entre ambos jugadores. En esta imagen, dado que el efecto de la interacción

es separar a ambos jugadores, podríamos considerarla repulsiva; pero si intercambiasen algo que les acerca, se trataría de una fuerza atractiva. Esta figura que acabamos de utilizar, es particularmente eficaz para explicar la fuerza nuclear fuerte. ¿Alguna vez se preguntó qué hace posible que los protones, siendo todos ellos positivos, soporten estar circunscritos a un núcleo tan pequeño y permanecer confinados allí?

En cada protón o neutrón, los quarks (es decir, las partículas más pequeñas que los constituyen) están unidos tan fuertemente entre sí, que no ha sido posible obtenerlos por separado. La tarea de mantener unidos a los quarks la realizan unas partículas mediadoras de interacciones, a las que se ha llamado "gluones" (cuyo nombre deriva de la palabra inglesa "glue", que significa pegamento). La tarea prioritaria del gluón es ser la partícula mediadora, o bosón, que "entrega mensajes" entre quarks para que éstos se mantengan unidos entre sí. Este "cotilleo" les permite que, si por alguna razón un quark se aleja de otro, la fuerza (que asimilaremos aquí como las ganas de volver a juntarse) ¡aumenta! Aunque el mensaje no diga precisamente «que la fuerza te acompañe», sucede que mientras más se alejan, con más fuerza se atraen, ¡como si estuviesen conectados físicamente por un resorte! Esto impide que los quarks que constituyen cada nucleón puedan separarse, y la situación misma lleva el merecido nombre de "confinamiento de los quarks". La fuerza fuerte mediada por gluones ocurre dentro de cada protón o neutrón, sin embargo, esta fuerza tiene una manifestación residual que es mantener unidos a los nucleones (protones y neutrones) en el núcleo de los átomos; como esta fuerza residual aplica al núcleo en su totalidad, se intercala una palabra y se habla de "fuerza nuclear fuerte". Podría uno preguntarse qué rol juegan los neutrones en el núcleo. Sucede que la carga eléctrica positiva que presentan los protones, les confiere una gran repulsión electromagnética, que la fuerza

nuclear fuerte por sí sola no es capaz de contrarrestar; por eso, el núcleo necesita de los neutrones, que al ser eléctricamente neutros, sólo experimentan fuerza fuerte y no se repelen eléctricamente. No obstante lo dicho, debo mencionar que la fuerza nuclear fuerte entre nucleones (o “manifestación residual” de la que se habló antes), requiere la participación de nuevas partículas mediadoras también formadas por quarks; unos bosones que se llaman “piones” (como toda partícula mediadora de fuerza, los piones son bosones) que no serán abordados en este texto.

“¡Cuantos de luz!
¡Ese sí que es un
bello nombre!”



BOCETO DE UNA MAÑANA LUMINOSA

Alen no tenía cómo saberlo, pero ese sería el último verano que pasaría en casa de su abuelo.

Le dejó servido el desayuno al anciano y se fue a la ribera del Liucura a recolectar hierba de la plata, melisa y toronjil cuyano. Había aprendido mucho. Cuando era pequeña, llegaba al par de horas con un gran cadejo de hierbajos inútiles, a menudo venenosos, y como el abuelo se reía hasta que le daba hipo, ella se quedaba malhumorada. Le parecía que de aquello hacía un siglo. Tomó el sendero del río y en un claro del bosque se tendió en la hierba, levantó las manos hacia la luz y la saludó. Cerró los ojos, disfrutó la tibieza del sol y el aroma intenso que se desprendía de las manzanillas, se echó a rodar de costado sobre el pasto todavía húmedo, respiró profundo y, como le enseñaba el viejo, a cada cosa que la rodeaba, le dio las gracias.

Ahora disfrutaba, como nunca antes, de la soledad y del frescor de la naturaleza con la primera luz de la mañana.

—¿Otra vez te quedaste leyendo “Orgullo y prejuicio”? —le preguntó el viejo, mientras sorbía el café. El abuelo la miraba de reojo, con su risa burlona cargada de intenciones, marcada como una cicatriz más entre las infinitas arrugas de su cara, y ella terminaba yendo muy temprano al río, porque ya nadie la entendía en esa casa.

“El viejo”... Al abuelo, ahora ella le decía «viejo».

—El viejo tiene razón —se dijo—. Ya nada es lo mismo.

Hasta el verano anterior, en sus caminatas hacia el río, no había día que no desafiase a la luz, lanzándole a voz en cuello preguntas disparatadas en medio del descampado. Alen era curiosa. Le preguntaba a la luz; «¿Cómo un mismo rayo luminoso, al tomar contacto con las cosas, las trata de manera tan distinta?, ¿por qué las rosas son rojas y las hojas verdes?, ¿por qué las piedras siempre son tan grises? ¡Injusticia! ¡Injusticia!» Despotricaba por el camino, riéndose sola. «¿Y el arcoíris?, ¿cómo era que la luz se disfrazaba de arcoíris, atravesando el agua que saltaba del torrente?» Por si eso fuera poco, esa misma luz, le entibiaba las manos y teñía el maqui. «¡Tan negro!», eso pensaba, mientras se echaba puñados de maqui a la boca y se le iban poniendo morados los dientes, la lengua, el mentón, la polera... Terminaba a menudo arrancando de los tábanos, que abundaban en esa época del año y señalando al Sol, le decretaba; «¡Algún día tendrás que contarme tus secretos!».

Eso hasta el año anterior; ahora se la pasaba soñando despierta, con la mente en otra parte, con la mirada perdida, con los pies en las nubes, en una mezcla rara de tristeza y ansiedad. Hubiera seguido analizando sus cambios de personalidad, pero se tropezó en una rama de litre y se dio un soberano costalazo. «¡Qué plancha!», fue lo primero que pensó. «Menos mal que estaba sola y que no soy alérgica al litre», se dijo cuando lo pensó mejor. Se levantó a gatas, se limpió las manos en los pantalones, se quitó las sandalias y se fue dando brincos en dirección al árbol caído, el tronco de un viejo roble que, inclinado en unos 30 grados, se balanceaba sobre el río, que de ese lado era calmo y oscuro. Descalza, trepó por el rugoso madero para ver desde allí el arcoíris que se formaba en la cascada, y disfrutando como en los tiempos de antes, se lanzó de bombita al agua, y sintió que su infantil alegría estaba de vuelta. «Tal vez me pegué en la cabeza —se decía en voz alta, mientras no dejaba de reír— ¡Porque soy yo de nuevo!».

De pronto, Alen se dio cuenta que veía el arcoíris desde un ángulo imposible. Curiosamente, no había caído al agua. ¡No! Estaba volando sobre el río. «Me están embromando», se dijo, pero en realidad, de inmediato había entendido lo que pasaba. «Estoy soñando» pensó, y como día tras día el viejo le majadereaba sobre la importancia de tener sueños provechosos en la vida, decidió que no tendría otra oportunidad como aquella para averiguar cómo se las arreglaba la luz para hacer tantas cosas distintas, y todas, al mismo tiempo.

—Señora de la Luz —dijo con fingida solemnidad, no fuera a ser cosa que por antipática, el sueño aquel se le escapara—, yo me llamo Alen, ¿me podría decir cuál es su nombre?

Como soñar es darle permiso a los disparates para que sucedan, la luz le contestó.

—Ni idea cuál es mi nombre, pero te puedo contar que los hombres de Ciencia me han llamado Radiación Electromagnética.

Eso no se lo esperaba. De puro susto, Alen se cayó al agua.

—Discúlpeme, señora —le dijo, ahora con respeto verdadero, olvidando que aquello era tan sólo un sueño, mientras nadaba a la orilla y volvía a treparse—, su nombre y su apellido son algo perturbadores, ¿no le parece?, ¿acaso vamos a quedar todos quemados?, ¿nos va a dar un golpe de corriente eléctrica?, ¿nos va a dejar pegados a un imán?

La Radiación Electromagnética se puso a reír.

—Eso es cierto —le dijo—, la mayoría de las personas piensa que soy sumamente peligrosa.

—¿Y no lo es? —preguntó Alen, pensando en la conveniencia de haber soñado que traía una capa protectora, un bloqueador solar... ¡algo!

—No siempre. Hay una parte de mí que es muy energética. Esa parte, sí podría resultarte muy peligrosa. Si te cuidas de no exponerte a mi parte peligrosa; tus problemas se reducen considerablemente.

Alen pensó en su mamá, en que era tan dulce, pero se volvía irreconocible cuando le venían los 5 minutos de furia.

—A la parte de mí que tú conoces, le llaman “Espectro Visible”; porque te permite ver los colores.

—¿“Espectro”? —dijo Alen—¿Como Samara, la niñita chascona que salía de la tele?

—No, no esa clase de espectro —respondió serena, la Radiación Electromagnética, y se dio a la tarea de explicar a la chiquilla, la naturaleza de las interacciones que podía establecer con la materia, con los objetos, con ella misma.

Ya casi era la mitad de la tarde (bien lo sabía su estómago), cuando Alen la interrumpió.

—De modo que... ¿en el calor del fogón, el calor que sale mis manos, la imagen de la tele, la antena de la radio, la luz del Sol, y hasta en la radiografía que me tomaron la semana pasada, está usted presente?, ¿la Radiación Electromagnética? ¡Qué increíble!

Eufórica, la señora de la Luz le contó de pasada, que todo lo existente podía explicarse haciendo participar a cuatro fuerzas distintas de la naturaleza; pero que una pariente suya, la Fuerza Electromagnética, era la responsable de que existiera el agua, las piedras, los árboles y los gatos.

—¿Y la Tierra? —le preguntó—, cuando la Tierra nos atrae; ¿también participa la Fuerza Electromagnética?

—¡Excelente pregunta! —respondió la Radiación Electromagnética, con visible entusiasmo—, pero la respuesta es no. Cuando se experimenta la atracción hacia la Tierra, participa una fuerza distinta. En la Ciencia, la llaman fuerza de gravedad.

—Debe ser muy fuerte —se dijo Alen a sí misma.

—De hecho, no lo es —respondió ufana, y con un pequeño imán que llevaba en la cartera, atrapó un clavo que estaba en la orilla del río y se lo entregó a Alen—, ¿lo ves? La Fuerza de Gravedad es tan débil, que este pequeño imán tiene más poder sobre el clavo que... ¡Toda la Tierra! —y se puso a reír, hasta que se le acabó el aire.

En un tono comprensivo, la Radiación Electromagnética, de cierta forma, comenzaba a despedirse.

—A veces, cuando el tratarme de cierta forma, a la gente de Ciencia no le sirve para explicar la naturaleza de las cosas; lisa y llanamente, me tratan de otra manera.

—¿Le cambian el nombre? —preguntó Alen.

—No exactamente. A veces, dicen que me comporto como una onda, y otras veces, como si estuviese formada por pequeñísimas cositas, a las que llaman fotones o “cuantos de luz”.

—¡Cuantos de luz! ¡Ese sí que es un bello nombre!

Sintió de pronto, el runrún de un abejorro sobre su nariz. En una fracción de segundo alcanzó a darse cuenta que estaba despertando. Hizo un esfuerzo enorme por retener el sueño, los personajes, las palabras, pero a medida que despertaba, la imagen se iba borroneando, como un paisaje bello que apenas se distingue detrás de la niebla, hasta que se desvanece por completo. En lugar de un recuerdo, apareció ante sus ojos una página blanca, y cuando ya estaba consciente de estar otra vez despierta, se dijo sin entusiasmo; «De nuevo soy yo, la realidad es como es». Pero no era cierto. Ella no lo sabía en ese entonces, pero serían sus sueños los que le fraguarían un espíritu inquebrantable, y serían sus palabras, las que le ayudarían a construir una realidad a su medida.

Así que no supo por qué lo hizo, pero se anudó el tupido pelo con un colet que llevaba en la muñeca, se quitó de prisa las sandalias y se fue corriendo al río, para treparse por el roble caído, y desde allí lanzarse, como antes, como siempre, de bombita al agua.

CONCEPTOS CLAVE: Campo eléctrico, Campo magnético, Carga eléctrica oscilante, Radiación electromagnética, Onda electromagnética, Longitud de onda, Frecuencia, Espectro de radiación electromagnética, Espectros de emisión, Espectros de absorción, Dispersión de Rayleigh, Reflexión difusa, Reflexión especular, Refracción, Difracción, Efecto fotoeléctrico, Radiación del cuerpo negro, cuantos y fotones, efecto Doppler en la luz.

2

La radiación electromagnética

LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

“Amo la luz, y el río, y el silencio, y la estrella”

Tiempo del Hombre (poema)

ATAHUALPA YUPANQUI

No sólo a Alen, la niña de la historia que les relataba recién, le resulta siniestro el nombre “radiación electromagnética”. Pasado el susto, la pregunta surge naturalmente. ¿Qué es la radiación electromagnética? Mi primer propósito es que dicho concepto deje de ser siniestro. La naturaleza ha convivido, desde siempre, con la radiación electromagnética, y ha elaborado sistemas y mecanismos para que nuestro hogar, el planeta Tierra, reciba radiación sin recibir perjuicios. Pero hay que decirlo; en buena medida, es el poder predictivo de la Mecánica Cuántica el que ha permitido el surgimiento de los avances tecnológicos, que han logrado que nuestro modo de vivir haya cambiado en la forma impactante en que lo ha hecho, y eso ha requerido hacer uso de la radiación electromagnética en los más diversos y cotidianos ámbitos.

Para acceder al concepto de radiación electromagnética, diremos primero que la Ciencia se aproxima a comprender la naturaleza y al conocimiento de sus propiedades, observando cómo ella se comporta; es decir, observa su actuar y procura obtener conclusiones sobre su conducta. El propósito se considera cumplido en cada etapa que la Ciencia esté enfrentando, si se consiguen dos cosas:

- a) Explicar los fenómenos.
- b) Predecir, adecuadamente, otros fenómenos.

La siguiente analogía puede ayudarnos a comprender esta manera de acceder al conocimiento. Por ejemplo, cuando confiamos en otra persona porque decimos que la conocemos bien, realmente lo que conocemos de ella es su actuar; de acuerdo a su actuar, le damos atributos. Podemos decir de un amigo/a que es una persona responsable, dedicada, solidaria, etc., porque hemos observado su conducta. Es su conducta la que explica su proceder (hasta ahora), y su conducta conocida nos permite predecir, que este fin de semana esa persona se reunirá con sus amigos y acumulará cajas vacías de pizzas, mientras disfruta de una maratón de su serie favorita, o que subirá algún cerro en bicicleta. No conocemos realmente a la persona, conocemos su actuar; podría tratarse de un/a sicópata y tenernos engañados a todos. Aunque la estadística dice que existe una alta probabilidad de que quien se ha comportado, hasta ahora, como una buena persona, siga manteniendo esa conducta... que realmente sea bueno/a, está muy cerca de la siquiatria, y muy lejos del alcance, o del dominio, de este libro. Entonces, ¿qué se puede decir de la radiación electromagnética? La radiación electromagnética tiene relación con la naturaleza eléctrica de la materia. Una carga eléctrica en reposo, genera en torno a ella un campo eléctrico estático (pero no un campo magnético). Si la carga se desplaza a velocidad constante, genera un campo eléctrico y un campo magnético. Pero, para que una carga eléctrica irradie ondas electromagnéticas, la carga debe acelerar. Una carga acelerada crea en su entorno un campo eléctrico variable, que induce (hace que se produzca) un campo magnético variable perpendicular a él, y éste, a su vez, uno eléctrico variable, y así sucesivamente. Esto se expresa diciendo que el campo electromagnético generado presenta dos componentes,

la parte eléctrica y la parte magnética (perpendiculares entre sí), y se comporta, como si la componente eléctrica fuese empujando a la componente magnética, que empuja a la eléctrica, que empuja a la magnética... y esta combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, ondulatorios, es la radiación electromagnética (ondas electromagnéticas), que abandona la fuente que la origina, transportando energía de un lugar u otro. A diferencia de otros tipos de onda (como las ondas sonoras que necesitan un medio material a través del cual viajar), la radiación electromagnética se puede propagar en el vacío, donde alcanza su máxima velocidad; 300.000 km/s, es decir, la velocidad de la luz.

Tal como la piedra que cae en un estanque de agua genera ondas concéntricas, si la radiación electromagnética fuese generada por un pulso de luz, describiría una esfera en torno al pulso.

Una carga eléctrica oscilante es una carga en movimiento acelerado (en su movimiento, acelera, frena o desacelera, y cambia de sentido), por tanto, es una fuente de radiación electromagnética. Todos los objetos conocidos (cipreses, amatistas, agapantos, el Sol, los planetas, los muebles, los queltehues y los humanos), al estar formados por átomos que poseen cargas eléctricas que vibran, generan radiación electromagnética. A baja temperatura, la emisión es infrarroja; no podemos verla, a menos que dispongamos de detectores de radiación infrarroja.

A continuación veremos qué caracteriza a una onda electromagnética. Si disponemos de un lazo de 10 metros, y dos personas lo toman de los extremos y lo agitan, por ejemplo, hacia arriba y abajo; generarán ondas. Dependiendo del modo en que lo agitan, generarán ondas grandes o más pequeñas.

En la Figura N° 2 se muestra el largo que corresponde a lo que se llama; la longitud de onda.

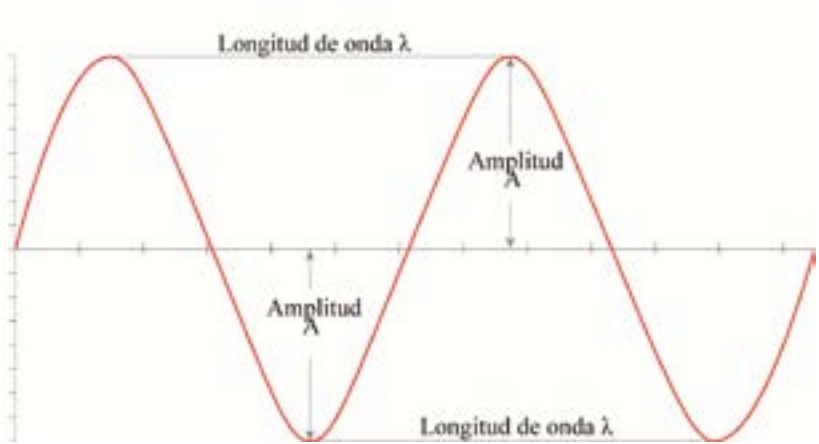


Figura N° 2: Longitud de onda

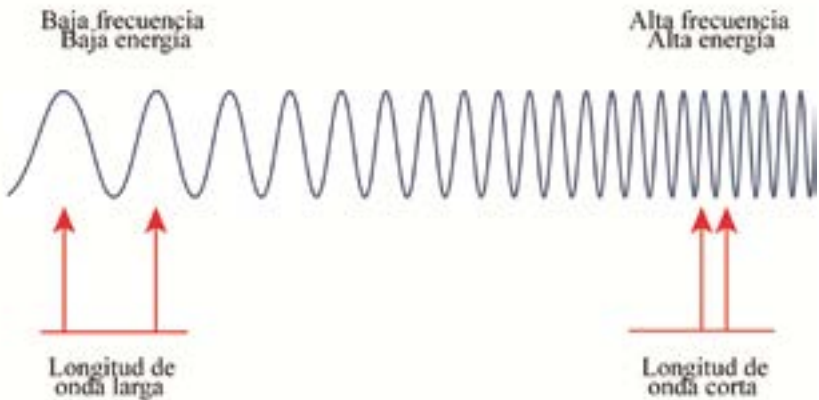


Figura N° 3: Longitud de onda y frecuencia

Si se toma nota del número de veces que la onda fluctúa en un tiempo determinado, por ejemplo en un minuto; estaremos determinando su frecuencia. Desde luego, para que haya más oscilaciones en la misma unidad de tiempo, la longitud de onda debe hacerse más corta; como aparece en la Figura N° 3.

El producto de la frecuencia por la longitud de onda, determina su velocidad; que en el caso de la radiación electromagnética es c , la velocidad de la luz.

Todo el conjunto de longitudes de onda posibles (o de frecuencias) tiene un nombre que, antes de seguro resultaba aterrador, pero hoy por hoy, con los efectos especiales asociados a las películas y juegos de video, apenas alcanza a ser rimbombante; se llama “espectro de radiación electromagnética”.

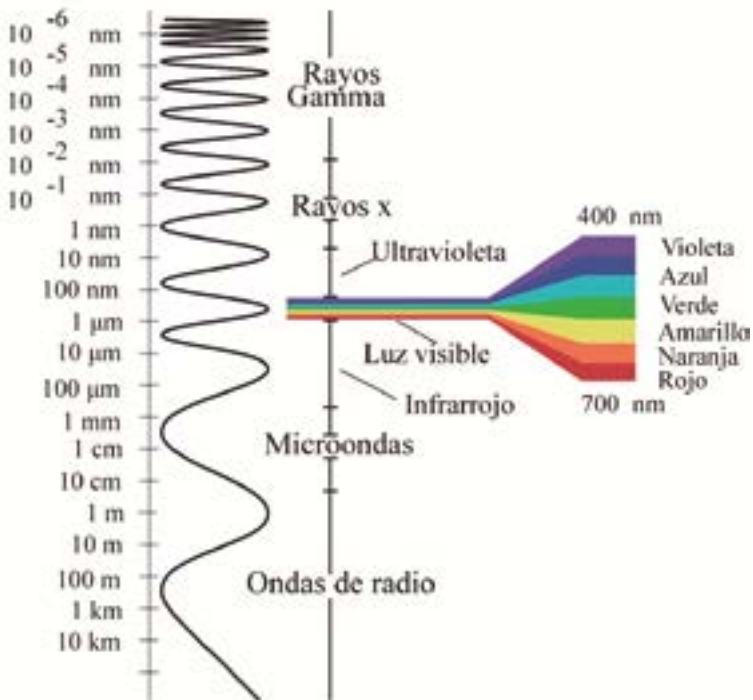


Figura N° 4: Espectro de radiación electromagnética

En la Figura N° 4 se muestra el espectro de radiación electromagnética. El significado de “nm” es nanómetro: 1nm equivale a 0,000000001m.

Las longitudes de onda más cortas, y más peligrosas, son las que corresponden a rayos gamma; son también las más energéticas. Le siguen en energía los rayos X; entre 0,01nm y 10nm. La radiación ultravioleta; va entre los 15nm y los 400nm. La luz visible; entre 400nm y 700nm. Al llegar a la zona infrarroja es razonable cambiar de escala; de modo que, en lugar de decir que comienza en 700nm, decimos que lo hace en 0,7 μ m (micrómetros) y llega a 1000 μ m. La radiación de microondas, va de 1 a 10 milímetros (mm), pero generalmente se la expresa en frecuencia en lugar de longitud de onda; en ese caso, se dice que va desde 30 giga Hz hasta 300 mega Hz, donde un Hz es un ciclo/segundo. Las ondas de radio tienen longitudes desde 1cm hasta kilómetros.

La radiación electromagnética puede ser útil, peligrosa o, eventualmente, inofensiva; interactúa con nosotros y/o con lo que nos rodea. Nuestra visión está preparada para ver la "zona visible" del espectro, aunque lo que observamos realmente son los efectos de la luz al interactuar con la materia. Llegar a saber que la luz era radiación electromagnética y que existe radiación que no podemos ver, requirió inteligencia y tenacidad.

LOS PERSONAJES TRÁS EL CONCEPTO DE ELECTROMAGNETISMO

Había una vez un niño llamado Michael, nacido cerca de Londres; era el tercero entre sus hermanos. El padre de Michael, el Señor Faraday, desempeñaba el oficio de herrero, y a pesar que era un hombre trabajador, no tenía buena salud. Como muchas veces no podía trabajar, sus hijos crecieron en la pobreza, y aunque siempre se apoyaron unos a otros como familia, Michael no tuvo acceso a educación, ni gratuita ni de calidad; pero tuvo imaginación y usaba provechosamente su inteligencia. Por cierto, también trabajaba, y mucho.

Desde muy joven, Michael se desempeñó como encuadernador, y no se daba tregua para leer las cosas que encuadernaba (si le parecían interesantes). El conocimiento adquirido en sus lecturas le permitió abrirse paso y trabajar, en forma experimental, en varios laboratorios. Hizo numerosos experimentos eléctricos en Física y en Química, y las leyes que descubrió, todavía hoy siguen siendo “Ley” para los electroquímicos; en una palabra, Michael era “seco”.

Si alguien piensa que Michael se aburría en el laboratorio, la respuesta es; ¡no! La gran variedad de resultados que dejó plasmados, a través de escritos y dibujos, da para pensar que de verdad se entretenía mucho. Él trabajaba con conductores eléctricos y con imanes. ¿Quién podría aburrirse trabajando con imanes?

Hasta el descubrimiento hecho por Michael; se podía obtener electricidad por medio de la fricción entre dos superficies, o bien mediante el uso de baterías o pilas voltaicas. Existía ya el galvanómetro, para detectar y medir la corriente eléctrica generada, pero las cantidades de electricidad que se obtenían eran muy pequeñas. Faraday realizó sus experimentos a partir de los trabajos realizados por Oersted y Ampere. Oersted ya había descubierto que una corriente eléctrica genera un campo magnético perpendicular a la corriente. Pero se requirieron muchos experimentos más, para llegar a relacionar, satisfactoriamente, la electricidad y el magnetismo.

Enrollando en espiral un hilo conductor, se construye una bobina. Para realizar el experimento, la bobina debe estar conectada previamente a un amperímetro. Si se introduce un imán dentro de la bobina y se le deja en reposo en su interior, no se detecta paso de corriente eléctrica. En cambio, al quitar e introducir el imán, es decir, variando el campo magnético dentro de la bobina; el amperímetro marca el paso de la corriente eléctrica. Fue así como Faraday demostró que un imán en movimiento, crea una corriente eléctrica en un hilo conductor que se encuentra

cerca de él. Los resultados de tales experimentos llevaron a la Ley de inducción electromagnética.

A estas alturas, ya habrá quedado claro que estoy hablando de Michael Faraday, y aunque hay demasiadas cosas interesantes que podría decir sobre él, creo importante destacar que debido a la carencia de formación rigurosa, él no dispuso de herramientas matemáticas para dejar expresado en ecuaciones adecuadas, los logros que estaba teniendo; a falta de ello, Faraday dejó los numerosos dibujos y esquemas de los que hablaba antes, en los que explicaba con claridad sus experimentos, también publicó su trabajo y sus ideas en varios libros. Michael Faraday pudo haber utilizado sus deficiencias como un pretexto para no heredarle a la comunidad científica, el conocimiento adquirido mediante su trabajo, sin embargo, él comprendía la contribución que estaba realizando, y comprendía también que otro científico, talentoso como él, y que contase con la fortuna de una mejor formación matemática, podía llevar a la Ciencia a la siguiente etapa.

Faraday murió en 1867, a la edad de 76 años. Tres años antes, otro hombre genial había publicado, a partir de la ideas de Faraday, su teoría del electromagnetismo. Él era James Clerk Maxwell. La mamá de James murió de cáncer a los 48 años; James tenía sólo 8, es decir, prácticamente se crió sin su madre. Además, creció en una zona rural. Se dice que a los 10 años, cuando ingresó formalmente al colegio, solía llevar por gusto un vestuario algo tosco, y como tenía un carácter huraño, sus compañeros lo molestaban. Antes de eso, tampoco lo había pasado bien. Había tenido un profesor bastante bruto, que a menudo lo golpeaba, aunque en aquel tiempo, era casi normal "educar" a los niños a golpes.

Si efectivamente, de niño, James Maxwell había sido algo tosco en el vestir, con el tiempo aprendería de elegancia, a tal punto, que logró plantear en sofisticadas ecuaciones

matemáticas, los fenómenos asociados a la electricidad y al magnetismo.

Faraday había trabajado las ideas de campo eléctrico y campo magnético, y había representado con dibujos, las líneas de fuerza de este último; como aparece en la Figura N° 5.

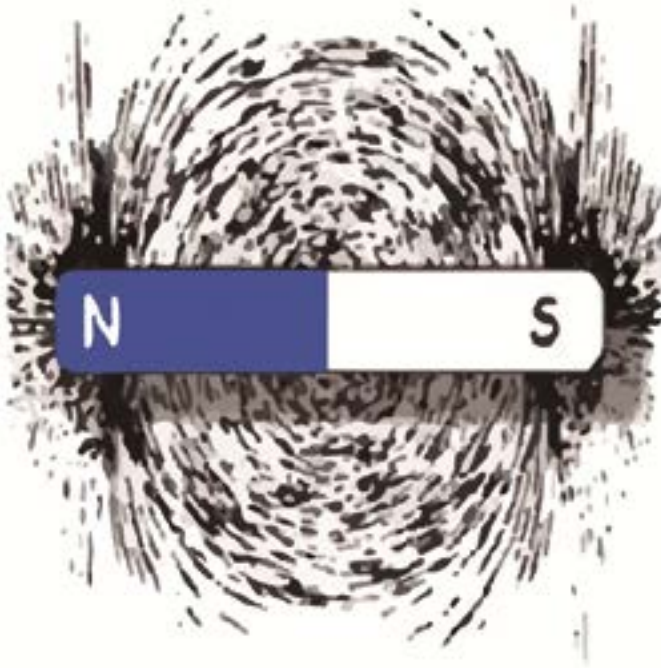


Figura N° 5: Líneas de campo magnético

Hay muchos conceptos en Ciencias que son denominados con términos de la vida cotidiana, asumiendo para ellos una nueva connotación; la científica. Uno de ellos es el concepto de “campo”. La palabra “campo” se utiliza para dar cuenta de una magnitud que presenta variaciones en una región del espacio. Si uno observa la disposición que adoptan las limaduras de hierro en torno a un imán, notaremos que cada punto del espacio

en torno a él, está sujeto a condiciones específicas de orientación y de intensidad, con que el campo se percibe.

En el caso particular de un campo eléctrico, cada punto del espacio tiene asociado un vector que representa el campo; este vector tiene una magnitud (una dirección) y una orientación de la fuerza (en este caso eléctrica), que se ejerce sobre una pequeña partícula cargada.

En un conjunto de cuatro ecuaciones, Maxwell logró dar sentido y explicación al trabajo previo realizado por Gauss, en relación con los campos eléctrico y magnético; al aporte de Ampere, en relación con las corrientes eléctricas; y desde luego, a la inducción de campos eléctricos y magnéticos, descubierta por Faraday. Las ecuaciones de Maxwell indican que si un campo eléctrico varía con el tiempo, induce un campo magnético; y si un campo magnético varía con el tiempo, induce un campo eléctrico. También advirtió, que estos campos eran descritos por un tipo de ecuación, que matemáticamente ya era conocida, llamada "ecuación de onda", de modo que las ecuaciones de Maxwell predicen la existencia de ondas electromagnéticas. En las ecuaciones aparece una constante que representa la velocidad de la onda, y el valor de esa constante resultaba demasiado cercano al valor de la velocidad de la luz (que ya había sido medida con una buena aproximación). Brillantemente, y de seguro con profunda emoción, Maxwell habría expresado:

«Esta velocidad se acerca tanto a la de la luz que... tenemos razones para concluir que la luz... es una perturbación electromagnética».

Sin embargo, a Maxwell en ese minuto no le fue posible corroborar empíricamente su teoría del electromagnetismo. Ese aporte fue realizado en 1888 por Heinrich Hertz. La deducción realizada por Maxwell es un trabajo de matemáticas sorprendente, pero no es menor el asombro cuando uno se acerca a contemplar las ideas y los

experimentos que han realizado otros científicos a través de la historia, para corroborar en la práctica tales predicciones. Esto sucede con la experiencia elaborada por Hertz.

Hertz diseñó un experimento en que hacía saltar una chispa entre dos esferas que formaban parte de un circuito eléctrico, pero que estaban separadas por un pequeño espacio de aire (en el circuito eléctrico, el recorrido de la corriente eléctrica comienza y termina en el mismo lugar; si en alguna parte del circuito intercalamos un interruptor, al activar el interruptor estamos cerrando el circuito y permitiendo que circule la corriente). No describiré el circuito diseñado por Hertz, el caso es que, cuando saltaba la chispa, se cerraba el circuito. El diseño era tal, que permitía que la chispa oscilase entre una esfera y otra, constituyendo con ello, un emisor de radiación electromagnética. Hertz razonó en términos donde, si se producía (como predecían las ecuaciones de Maxwell) radiación electromagnética (debido, en este caso, a la descarga oscilante), debería inducirse la misma descarga entre dos esferas ubicadas en los extremos de un receptor metálico con forma de letra C. ¡Claro que el receptor estaba a varios metros del emisor, sin que hubiese entre ellos ningún contacto! Lo puso a prueba y se observó la chispa, algo más débil, entre las esferas del receptor. Si hubo espectadores de aquel experimento, bien pudieron haber pensado que era magia. Sin embargo, escuchar la radio o usar internet, hoy es posible gracias a que existe un equipamiento diseñado para captar ondas que están en el aire, que son emitidas a grandes distancias del lugar en que nos encontramos, y aunque las ondas vienen viajando por el aire, la realidad es que no necesitan del aire, porque estas ondas pueden viajar perfectamente en el vacío.

La longitud de las ondas con las que estaba trabajando, estaban en el rango de las que después fueron llamadas "ondas de radio". Heinrich Hertz había descubierto las ondas de radio, y como homenaje, la unidad de frecuencia recibe su nombre; de modo que $1 \text{ Hertz} = 1 \text{ ciclo/s}$.

INTERACCIÓN DE LA LUZ CON LA MATERIA

La luz
toca las cosas,
las despierta.

Les dice: soy la luz. Les dice: óyeme.
Les pregunta: ¿cómo eres?

Entonces, los objetos materiales; el aire, las palomas,
los blancos pizarrones de las salas de clase,
las piedras del camino, el espejo y la luna,
y la ropa coqueta que juega con el viento,
le ofrecen sus respuestas;
diferentes, diversas.

El que veamos objetos de colores, otros blancos, otros negros, a veces transparentes, o que podamos vernos frente a un espejo, indica; por una parte, que nuestra visión abarca sólo la zona "visible" del espectro; y por otra, que la luz puede interactuar de diferentes maneras, con diferentes materiales. El resultado de lo que podemos ver, dependerá no sólo de las propiedades del objeto, sino de las características de la luz con que se ilumina. Lo que percibimos como un día luminoso, no es otra cosa que luz directa (e indirecta) del Sol al interactuar con la atmósfera. En el espacio exterior (esencialmente vacío, sin atmósfera), la luz no tiene con quien interactuar, por eso de noche se ve "negro". La luz viene, a través del espacio, jugando el juego de la onda que antes les mencioné; la componente eléctrica, que crea componente magnética, que crea componente eléctrica, que crea componente magnética, que crea... quizá por ocho minutos (si proviene del Sol) o por 4,3 años viajando a la velocidad de la luz (si proviene de Alfa Centauri, nuestra estrella más cercana). Sólo cuando alcanza la atmósfera terrestre, es cuando le empiezan a pasar cosas que podemos ver.

El cielo se ve azul debido a un fenómeno llamado dispersión de Rayleigh, que se produce entre la onda electromagnética y los compuestos gaseosos de la atmósfera. La luz “conversa un poquito” con cada molécula, y como respuesta, las moléculas dispersan esa luz en todas las direcciones. En este proceso, no todos los colores de la luz se ven favorecidos por igual. Fue Lord Rayleigh quien dedujo una expresión matemática, según la cual, el color azul (la longitud de onda correspondiente a ese color) se dispersa más intensamente. Los atardeceres en cambio, se ven rojizos porque la luz azul (en su recorrido) ya ha sido dispersada, y comienza a notarse la intensidad de la luz roja.

Es bastante conocido que en aquello que vemos blanco, todos los colores de la luz que inciden sobre el objeto, son reflejados por él; y si vemos negro, es porque toda la luz es absorbida por el objeto, y no permite que nada se refleje. La luz blanca contiene todos los colores. Cuando la luz blanca incide sobre algo que vemos blanco, es porque se ha producido lo que se llama reflexión difusa de la luz, es decir; toda la luz alcanza la superficie y sale de ella sin haberse absorbido, reflejada en direcciones al azar. Es lo que la diferencia de la reflexión especular. En esta última, el ángulo incidente de la luz es el mismo que el ángulo reflejado, y es lo que permite que el espejo nos devuelva una imagen definida de cuanto le rodea. Ninguna de las dos superficies absorbe la luz, pero la reflexión especular se produce en aquella superficie lisa; en cambio, si la superficie es rugosa, la reflexión será difusa. Si un objeto se ve de un color determinado, por ejemplo rojo, indica que se absorben el verde y el azul, y sólo se produce reflexión difusa de la luz roja. La reflexión difusa nos permite ver el objeto.

Cuando atraviesa el vacío, es cuando la luz se demora menos en su recorrido; porque no tiene con quién “pasar a conversar”. Cuando la luz pasa de un medio a otro, por ejemplo del aire al agua o del aire a algún objeto

transparente, decimos que experimenta refracción; porque le cambia la velocidad. Mientras más denso sea el medio al que entra, más se tarda la luz en viajar a través de él. Podemos mirar por una ventana, porque la luz se refracta a través del vidrio, y también veremos nuestra propia imagen, por reflexión.

Vale la pena tener en cuenta, que el color con que percibimos un objeto, finalmente depende; del propio objeto, de la iluminación, de cómo funciona el mecanismo de la visión, y de quién lo ve. Un ejemplo extremo corresponde a una fotografía que años atrás se hizo viral en redes sociales; la del famoso vestido que algunos veían blanco y dorado, y otros azul y negro. Otro fenómeno que presenta la radiación electromagnética (propio de las ondas) es la difracción. Esto corresponde a la desviación que experimenta la luz cuando se encuentra con un obstáculo, o al pasar a través de una rendija. Le sugiero hacer suya la siguiente experiencia: en una mañana soleada en una casa de campo, con un granero con techo de zinc sin cielo raso, un rayo de Sol se filtra por el orificio de unos tres milímetros que ha dejado un clavo desprendido del techo, la luz que atraviesa el orificio describe un cono de luz, y cuando alcanza el piso de tierra, es como una mancha luminosa y difusa de varios centímetros; he ahí la difracción de la luz, que se abrió en abanico al pasar por la pequeña abertura.

La experiencia, realizada en forma minuciosa, revelará que la mancha luminosa se compone de círculos concéntricos que forman un patrón de difracción. Un ejemplo, menos romántico, lo dan los equipos que transmiten wifi dentro del hogar; el wifi transmite sus señales, en un valor de longitud de onda intermedio entre microondas y ondas de radio, su longitud fluctúa entre 7 y 12 cm, esta onda chocará con las paredes, pero pasará por las rendijas de las puertas e irá abriéndose paso hasta llegar al equipo en que usted esté trabajando. Las señales de radio pueden viajar kilómetros difractándose en los

obstáculos hasta llegar a un receptor, claro que si se vive en un lugar rodeado de cerros, será necesaria una antena repetidora.

Cuando los materiales absorben la radiación, van asimilando energía y la devuelven en algo que percibimos como calor. Decimos que el objeto se calienta. Si se dispone del detector adecuado, se puede percibir la radiación que se desprende del objeto en el rango del infrarrojo.

Si uno se pregunta por qué nuestros cuerpos (y los árboles y los autos) pueden emitir radiación electromagnética; la respuesta se relaciona con que todo está hecho de átomos y moléculas, que vibran todo el tiempo. En la vibración; las moléculas, los átomos, juntan, separan y/o rotan sus enlaces, y los enlaces están hechos de electrones. Cuando hablamos de vibración de enlaces; los electrones son quienes vibran, generando radiación electromagnética, que será infrarroja, dependiendo de la temperatura a la que está el cuerpo u objeto que la emite.

Nuestro cuerpo pierde calor por varios mecanismos: mediante la evaporación del sudor; mediante la conducción (es decir, cuando se toma contacto con algo más frío); a través de la convección del aire que nos rodea (ya que naturalmente, el calor fluye de mayor a menor temperatura); y sobre todo, nuestro cuerpo pierde calor por radiación: por emisión de radiación infrarroja. Parte del calor que nuestro cuerpo pierde, lo hace al emitir radiación infrarroja; pero también estamos absorbiendo radiación infrarroja del mundo que nos rodea, y así mantenemos la temperatura corporal.

Las regiones de la radiación electromagnética

La luz visible es radiación electromagnética, pero la radiación electromagnética abarca un espectro mucho más amplio que aquello que podemos ver. Si se dispone

de un prisma y se hace incidir en una de sus caras un haz de luz blanca, observaremos dos cosas; que se pueden separar todos los colores del espectro luminoso, y que ese haz de colores sale desviado respecto de la dirección de incidencia. Esta separación de colores se produce por refracción; porque las distintas longitudes de onda (los distintos colores) que componen la luz, viajan a diferentes velocidades en el material (que es el prisma). Así mismo, el arcoíris se forma debido a las diferencias en la refracción que experimentan las distintas longitudes de onda al atravesar las gotas de lluvia. La desviación es mayor para la luz azul, que es la más lenta en atravesar el material, y menor para la roja.

Descomponer la luz visible en sus colores, fue lo que hizo Isaac Newton a fines del siglo XVII; haciendo pasar un rayo de Sol por una rendija y dirigiéndolo a un prisma, tal como se observa en la Figura N° 6.

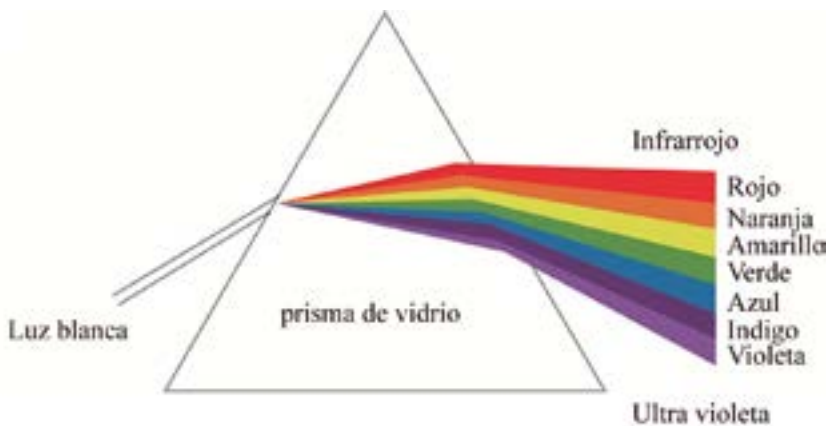


Figura N° 6: Descomposición de la luz por un prisma

Transcurrió más de un siglo sin que nadie se percatase que aparte de la luz visible, hubiese otro tipo de luz, que no éramos capaces de ver; hasta que entró en escena William Herschel. Músico como su familia de origen, Herschel

emigró a Inglaterra donde pudo ejercer su profesión de intérprete de oboe. De haber continuado con aquella opción, habría sido exitoso (talento no le faltaba), sin embargo, llegó a sus manos un libro de Astronomía, que le cambiaría la vida para siempre. Prontamente mostró habilidades en la construcción de telescopios, y contando con la colaboración de su hermana Caroline, se dedicaron a observar y registrar datos relacionados con la bóveda celeste. En 1781 descubrió el séptimo planeta; al que llamó Jorge, en honor al rey británico de aquella época. Claro que los seis planetas anteriores descubiertos en el Sistema Solar, tenían nombres relacionados con la mitología griega, por eso con el paso de los años, la comunidad de Astronomía modificaría el nombre del planeta, y desde entonces sería conocido como Urano.

En 1800, mientras Herschel realizaba el estudio de la radiación electromagnética obtenida descomponiendo la luz a través de un prisma, se le ocurrió también medir la temperatura asociada a cada color. Pudo notar que, yendo desde el azul hacia el rojo, la temperatura iba en aumento. En el proceso usaba (sólo para comparar) unos termómetros de control, ubicados fuera de donde se veía el espectro, por ejemplo, al lado del color rojo (pero, insisto, fuera de él), y allí, se encontró con una sorpresa. Del lado de la zona roja, donde ya no había color, observó que la temperatura también subía, y no sólo eso; ¡era la temperatura más alta de todas! Luego hizo otros experimentos y registró lo que sucedía en esa zona invisible. Al igual que el resto del espectro; la radiación de esa zona invisible podía refractarse, absorberse y reflejarse. Herschel había descubierto la región infrarroja del espectro. Imagino su sorpresa y la tremenda emoción de Caroline con este descubrimiento.

La radiación ultravioleta fue descubierta por Ritter en 1801. Ritter había decidido seguir los pasos de Herschel; estudiar las diferencias que pudieran producirse en algún proceso y relacionarlo con los distintos colores

del espectro. Para ello descompuso luz blanca mediante un prisma, y expuso cierta cantidad de cloruro de plata a cada uno de los colores de ese espectro luminoso. Al ser expuesto a la luz, el compuesto cloruro de plata se ennegrece, porque reacciona con la luz y produce plata metálica. Ritter se dio cuenta que la reacción generaba menos producto (ennegrecido) en el color rojo, e iba aumentando hasta llegar al azul. Finalmente, probó exponiendo cloruro de plata más allá del violeta (en la zona invisible donde no había color) y resultó que esa zona invisible del experimento, era la zona más reactiva.

La radiación ultravioleta puede causar daño a los seres vivos y dañar nuestra piel; esa aparente desventaja puede redundar en beneficio cuando se le da el uso adecuado, ya que la luz ultravioleta es utilizada en esterilización y para desinfección de envases, y todo tipo de materiales que requieren asepsia (eliminación de virus y bacterias).

En sus comienzos, durante y con posterioridad a la Segunda Guerra Mundial, tanto las ondas de radio como las microondas (recuerde que ambas son radiación electromagnética, pero de distinta longitud de onda), estaban dirigidas al área de las comunicaciones y de radares asociados a la seguridad del espacio aéreo. El masivo uso actual de los hornos de microondas era un aspecto que no estaba contemplado, y resultó como consecuencia de un hecho no premeditado. En 1945, el ingeniero norteamericano Percy Spencer, estaba buscando condiciones de mejoramiento de un radar para la empresa en que trabajaba, y comprobó que un chocolate que llevaba consigo, estaba derretido. No tardó en corroborar que la causa de tal efecto era la exposición a las microondas.

Pasa a ser una anécdota que los primeros hornos de microondas fueran enormes; costaban varios miles de dólares y requerían una tubería por donde pasase agua fría para su refrigeración. El agua de enfriamiento del

sistema debe ir por una tubería aparte, generalmente en forma de serpentín. Su propósito es tener control sobre la temperatura del horno sin que se vuelva peligroso, de modo que la temperatura del agua de enfriamiento va aumentando a medida que recorre las zonas más calientes que se desea mantener bajo control. No hubiese sido mala idea, dirigir la salida del agua de enfriamiento hacia la regadera de la ducha, y tomar un baño tibio mientras se calentaba el desayuno. Así mismo, en sus comienzos, los hornos de microondas produjeron rechazo y temor; la gente pensaba que su efecto sobre los alimentos los volvería tóxicos. Es probable que ese temor haya provenido del exceso de confianza con que se asimiló otro descubrimiento previo; los rayos X.

Los rayos X fueron descubiertos por Roentgen en 1895. Él se dio cuenta que esta radiación invisible podía atravesar cuerpos opacos y también podía captarse en una placa fotográfica (como ocurre en una radiografía), y no tardó en radiografiar la mano de su esposa; con anillo de bodas incluido. Les llamaron X porque no sabían qué los producía, tampoco imaginaban que eran peligrosos; pues lo son.

Tanto los rayos X como los rayos gamma constituyen radiación ionizante, es decir, pueden atravesar cuerpos, pero también pueden arrancar electrones de los átomos; causando destrucción celular. Los rayos X se producen cuando a un haz de electrones acelerados, se les hace frenar violentamente contra una placa metálica; en cambio, los rayos gamma son el resultado de una reacción de desintegración de un átomo radiactivo (o de algún otro tipo de reacción nuclear).

El uso actual de los rayos X en medicina, supone desde una sencilla radiografía convencional; a una grabación de video que muestre el funcionamiento de los órganos posterior a la ingesta de un medio de contraste; hasta la tomografía computarizada, en que con o sin medio de

contraste, se realiza y registra un barrido de imágenes de los órganos a estudiar.

Hasta bien avanzados los años 30, los rayos X fueron recibidos por el público en general con mucha expectación y poca precaución. Sus usos fueron tan variados, que incluso eran parte de un espectáculo donde la gente pagaba para verse interiormente en una placa fotográfica; no se tenía aprensión por exponerse a la radiación una y otra vez, o por tiempos de exposición peligrosamente largos. En Estados Unidos era común su uso, nada menos que en las zapaterías. Una tienda de calzado que se respetase, ofrecía a sus clientes el servicio de rayos X para que el zapato a adquirir tuviese un calce perfecto. Después de haber conocido las consecuencias de tales riesgos, es natural que el horno de microondas haya sido visto bajo sospecha. Sin embargo, la amplia gama de avances tecnológicos con que desarrollamos hoy nuestras vidas, no serían posibles, de no ser por el progreso de la Ciencia en el conocimiento, el manejo adecuado de las distintas regiones de la radiación electromagnética, y al éxito predictivo de la Mecánica Cuántica.

Hoy, mediante la resonancia magnética nuclear (RMN) pueden obtenerse espectaculares imágenes que permiten el diagnóstico de enfermedades. La RMN trabaja en longitudes de onda correspondiente a ondas de radio, pero con el propósito de impedir temores infundados (en los pacientes), relacionados con la energía nuclear (que no corresponde), se suele denominar “resonancia magnética de imagen” o sólo “resonancia magnética”.

En menos de un siglo, la Ciencia ha proporcionado a la Tecnología, los fundamentos para proveernos de un mundo que en las películas de las viejas tardes de cine, hubiese pasado por ciencia ficción. Curiosamente, (apenas con esbozos de antimateria) estos avances nos han llevado a cohabitar (metafóricamente), quizá mundos paralelos, quizá mundos separados cuánticamente unos de otros. No es raro, que parte del imaginario colectivo, señale a

NOTA DE PROFUNDIZACIÓN:

El fundamento de la técnica tiene su esencia en una propiedad de las partículas subatómicas (en este caso el núcleo de algunos elementos), denominada “spin nuclear”, que puede asimilarse a una partícula cargada que al girar se comporta como una pequeña barra magnética. La técnica requiere la aplicación de un campo magnético externo intenso, que obligue a los spines nucleares (las partículas subatómicas, electrones, protones etc., presentan spin; que se asocia al sentido de giro de dicha partícula) a alinearse de forma paralela o antiparalela respecto de la dirección del campo externo. Esto ocurre estadísticamente, dejando un pequeño exceso de núcleos con spin en alineación paralela al campo externo. Hecho esto, se somete a los núcleos a una señal de radiofrecuencia, y se habla de resonancia cuando la energía proporcionada por esta radiofrecuencia es la necesaria (exactamente la requerida), para que el exceso de núcleos paralelos puedan “saltar” al estado antiparalelo.

Pues bien, como es de suponer, todo lo que sube tiene que bajar y los núcleos que cambiaron su estado, deben devolverse para recomponer la distribución original de poblaciones de spines paralelos y antiparalelos. Esta parte del proceso se llama “relajación”, y la señal de relajación que se registra, tiene relación con el entorno del núcleo que se relaja, por tanto con las características del átomo particular y con su ambiente molecular. Esta información se transforma en imágenes que se utilizan para establecer si un tejido está sano o deteriorado. Es sorprendente, ¿verdad?

la Ciencia como la causante de tragedias, toda vez que el conocimiento ha sido utilizado por voluntad o por desidia, en perjuicio del entorno o de los seres humanos. Esta falta de comprensión de la Ciencia, le otorga al científico un rol asimilable al de un “mago” que hace posible el adelanto tecnológico. El conocimiento no está al alcance de todos, tampoco lo están los adelantos tecnológicos de los que nos proveen. De hecho, si se da una mirada a historias ambientadas en mundos reales o fantásticos (desde “Los Reyes Malditos” a “Juego de Tronos”, pasando por la saga de “Los Juegos del Hambre”), el manejo del poder (el poder en la administración de los recursos y el

manejo social de la ignorancia) ha impuesto (¿y lo seguirá haciendo?) una visión apocalíptica de lo que la humanidad podría llegar a ser.

Existe una dualidad más incomprensible aún que la de onda-partícula; menos intuitiva que el principio de incertidumbre: la incomprensible dualidad de la naturaleza humana, que entrado ya el siglo XXI, va caminando siempre por un despeñadero situado entre la belleza y el horror. No es el avance científico en sí mismo la causa de los grandes problemas de la humanidad; buscar allí el origen, es simplemente poner el foco donde hay más luz. Quizá debamos buscar en zonas más oscuras; quizá en nuestra propia naturaleza. Desde la invención de la rueda, el conocimiento ha podido utilizarse para hacernos avanzar por caminos con agilidad inesperada, o como espectáculo cruel de la Edad Media, para quebrantar los huesos del prisionero, enroddado bajo el peso de la carreta.

EL ESPECTRO DEL SOL

Las líneas de Fraunhofer

En 1814, un físico-óptico alemán, llamado Joseph Fraunhofer, realizó la misma experiencia de descomposición de la luz a través de un prisma que había hecho Newton, pero con gran detalle.

Fraunhofer quedó huérfano a los 11 años. A esa edad entró a trabajar con el vidriero de la corte; le llenaban el día con mandados y todo tipo de tareas, de modo que no le quedaba tiempo para aprender el oficio, y desde luego, no se le permitía estudiar. Pasó tres años trabajando en ese lugar y un día, sin previo aviso, el edificio en que estaba ubicado el taller de cristalería se derrumbó. Joseph quedó atrapado bajo los escombros. Aquella infeliz circunstancia, le cambiaría la vida.

Quiso su buena estrella, que en el proceso de ser rescatado se involucrase en dirigir las maniobras, el

mismísimo príncipe Maximiliano José (conocido más tarde como Maximiliano I de Baviera). A partir de entonces, bajo la protección del príncipe, pudo continuar estudios y especializarse en Óptica. Llegó a ser uno de los mejores fabricantes de lentes para telescopios de su época, e incluso, haciendo uso de prismas y lentes de buena calidad (que el mismo pulía), construyó un instrumento óptico; el “espectroscopio”, precursor de los actuales espectrofotómetros. Fue así como descubrió, en el espectro del Sol, las que son conocidas como “líneas de Fraunhofer”, que se observan en la Figura N° 7.

Este hombre excepcional, a los 31 años era director del Instituto de Óptica de la Abadía de Benediktbeuern (mismo lugar donde fue encontrado el manuscrito de Carmina Burana). Sin embargo, (¡Oh fortuna, velut luna / statu variabilis!, como nos lo recuerdan aquellos versos de la bellísima cantata) Fraunhofer tuvo una corta vida, muriendo de tuberculosis a los 39 años.

Lo que Fraunhofer observó en su experimento de descomposición de la luz por un prisma (proyectada en una pantalla), fue que, entre los colores obtenidos provenientes de un rayo de Sol, se veían también unas misteriosas líneas negras; unas cuantas, casi 600. Desde luego, se desconocía la causa de las líneas negras, y no se sabía con qué relacionarlas.

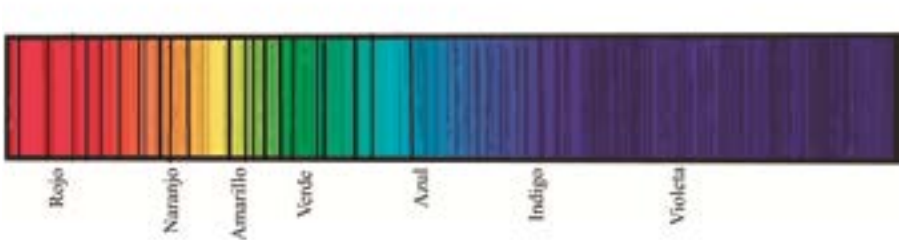


Figura N° 7: Líneas de Fraunhofer

Los experimentos de Kirchhoff y Bunsen

En 1859, Kirchhoff y Bunsen, trabajaban en equipo; Kirchhoff era un excelente teórico y Bunsen un excelente experimentalista. Sí, Bunsen, el señor del mechero.

Bunsen estaba haciendo experimentos, sometiendo compuestos de diferentes elementos químicos a la llama de un mechero. Esta es una experiencia bonita, que todavía hoy, disfrutan los estudiantes en los laboratorios. Dependiendo del elemento, pueden observarse colores diversos y bellos. Por ejemplo; la sal común (cloruro de sodio) debido al sodio, produce una llama amarilla intensa; una sal de potasio, produce una llama violeta pálida; y una sal de calcio, producirá una llama rojiza fugaz.

La energía térmica (que aporta la llama) permitirá que los átomos de los compuestos químicos pasen a la fase gaseosa, y que los electrones de estos átomos, salten a niveles de energías superiores. Se dice entonces, que los átomos están en estado excitado, pero como no pueden quedarse excitados para siempre; los electrones deben deshacerse de esa energía extra, y lo hacen emitiendo la energía que adquirieron y retornando a su estado basal.

Si la luz que emite cada elemento químico sometido a la llama, se dirige hacia un prisma para que sea descompuesta, lo que se observa en la pantalla son líneas de colores; líneas muy definidas sobre un fondo negro. Ese patrón que presentan las líneas de colores, como si se tratase de un código de barras, es propio y diferente para cada elemento. Es posible que, aun contando con la información anterior, a cualquiera de nosotros le cueste comprender el fenómeno. Pero esto, que para más de alguno podría ser un problema, no lo fue para la inteligencia y la tenacidad de Kirchhoff y de Bunsen.

Para obtener el máximo de información de sus experimentos; la luz producida por el elemento gaseoso en la llama, la canalizaban hacia un prisma, y luego el haz

resultante, era proyectado sobre una pantalla. Nosotros ya sabemos (de los párrafos anteriores), que Kirchhoff y Bunsen no observaron líneas negras como las de Fraunhofer, sino líneas de colores sobre un fondo negro. Líneas de colores en posiciones tan específicas que se dieron cuenta, que siempre que había el elemento sodio en la llama, aparecían dos líneas amarillas características; que corresponden a longitudes de onda de emisión del sodio, y se las conoce como “líneas del sodio”.

Espectros: huellas digitales de los elementos químicos

Los espectros en que se observan líneas de colores, sobre fondo negro, se llaman “espectros de emisión”, porque cada elemento químico emite luz; emite energía. Después de pasar esa luz por el prisma, dependiendo de su longitud de onda, se expresa en líneas de colores que dan un patrón; es una huella que permite identificar a cada elemento, como aparece en la Figura N° 8 (que se verá un poco más adelante).

¿Pero qué hacer para dar con las líneas negras obtenidas por Fraunhofer? Kirchhoff ideó una experiencia sencilla y sorprendente.

¿Qué debería pasar si en el camino que recorrerán las líneas de emisión de un elemento, antes de llegar a la pantalla, se interpone una fase gaseosa que sea capaz de absorber, específicamente, las longitudes de onda (líneas de emisión) que ese elemento emite?, ¿qué se debería ver en la pantalla? Pues bien, esto fue lo que precisamente propuso Kirchhoff. Instaló una lámpara potente, que contuviese sodio en la llama, es decir, una lámpara que emite las líneas del sodio, y la dirigió a una llama que se producía quemando una solución de alcohol que contenía sales de sodio! Los átomos en la llama de alcohol, comparados con los de la primera lámpara, corresponden

a una fase gaseosa fría; al recibir la luz de la lámpara de sodio, sus electrones (ansiosos quizá de vivir la experiencia de un estado excitado) la absorben. El sodio de la llama fría se acusa solito; la luz incidente contiene energías precisas para saltar a estados excitados. «Soy el sodio –les dice–, reconozco mis líneas (la energía que le permite saltar al estado excitado), cuando las veo».

Si se descompone mediante un prisma, la luz que sale de la llama alcohólica; se obtienen en la pantalla todos los colores del espectro que provienen de la lámpara de incidencia; todos, menos las líneas que el sodio absorbió, en su lugar, aparecen ¡líneas negras!; como las misteriosas líneas de Fraunhofer. Esto corresponde a un espectro de absorción. Ver Figura N° 8.

Fraunhofer había inventado el espectroscopio, Kirchhoff y Bunsen son los inventores de la Espectroscopía; herramienta que hoy es indispensable en los análisis químicos de las sustancias que están presentes en todos lados (en la industria, en la naturaleza o en los alimentos, y por cierto, también permite determinar los elementos químicos que se hallan en las estrellas). En cuanto al Sol, las líneas negras de su espectro aparecen debido a que, siendo su atmósfera muchísimo más fría que su interior, en ella existen diferentes elementos que absorben fotones específicos que se han producido en su zona interna.

Al entender el sentido de las líneas negras, a todos les vino la locura por identificar los elementos de la atmósfera solar, y de seguro tuvieron mucho material para entretenerse, incluso los domingos por la tarde.

Así, sin viajar a las estrellas a tomar muestras de su composición, basta con estudiar detenidamente la luz que de ellas procede, para determinar los elementos que las conforman.

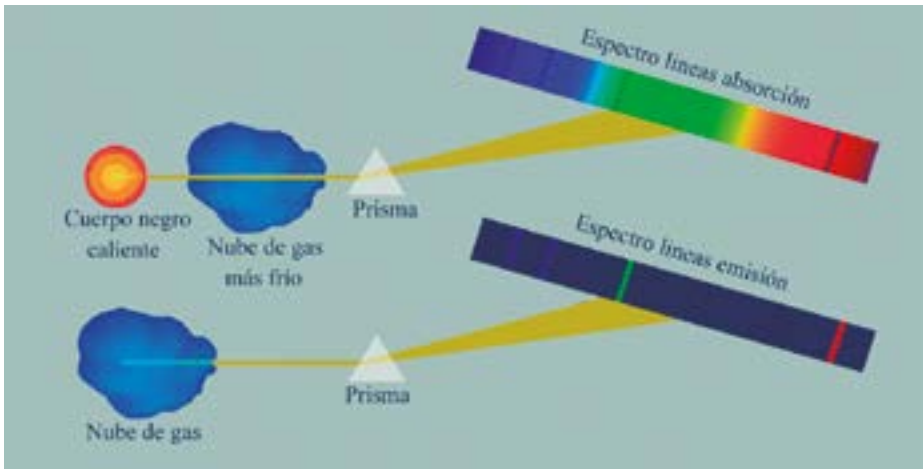


Figura N° 8: Espectros de absorción y emisión

EL NACIMIENTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

El desarrollo de la Mecánica Cuántica empezó a gestarse en el 1900 y se impuso de manera inevitable, mientras aun algunos pensaban que en Física estaba todo dicho; resulta que quedaba mucho por hacer, y por decir.

La radiación del cuerpo negro

Cuando se registra la luz que emite un cuerpo sólido, también se obtiene en la pantalla su espectro de emisión, pero no en forma de líneas, sino como continuo de colores visibles; con los detectores apropiados, incluso puede registrarse la luz no visible (sea infrarroja o ultravioleta). Entonces, un cuerpo sólido... ¿emite luz? A baja temperatura, un cuerpo sólido no emite luz visible, y aunque sí puede emitir radiación infrarroja, esa "luz" es invisible para nosotros. Pero un cuerpo sólido caliente, sí emite luz visible; si se aumenta más la temperatura, irá emitiendo sucesivamente los colores del espectro

(desde el rojo cuando está caliente, hasta llegar al azul a temperaturas muy altas).

Para todos es conocido, que si un objeto de metal está al rojo es porque está a muy alta temperatura; el color de la lava en una erupción volcánica nos sugiere lo mismo. Existe un conocimiento que los artesanos que trabajan con metales fundidos, manejan desde hace mucho tiempo, y es que; independiente del material que lo compone, el color con que brilla un cuerpo depende sólo de su temperatura. Esto, bien lo sabían los científicos a fines del siglo XIX, pero no lograban comprender la causa. Por eso, para tratar de entender la razón de que un sólido calentado, se vea de un color que sólo depende de la temperatura a la que se encuentra (y no del material del que está hecho), inventaron un concepto teórico; “el cuerpo negro”, y se pusieron de cabeza a estudiar la radiación del cuerpo negro. Por cierto, no es lo mismo “cuerpo negro” que “agujero negro”; de hecho, el estudio de los agujeros negros vino a surgir varias décadas después.

El cuerpo negro es una caja, o cavidad, con un orificio por el cual puede entrar o salir radiación electromagnética. Cuando decimos que la emisión del cuerpo negro no depende del material con que esté construido, estamos pensando en un material resistente; porque si fabricamos un cuerpo de cartón, por mucho que lo pintemos de negro y le hagamos un hoyo, si lo ponemos a alta temperatura, de seguro, se quema antes de alcanzar a medir nada.

Aunque el cuerpo negro es una idealización, se dispone de materiales que permiten construir cuerpos negros que posibilitan llevar a cabo los estudios. Un cuerpo negro; debe ser opaco, no debe reflejar nada, debe absorber toda la radiación que le incide, y debe ser capaz de emitir radiación. Debido a que no refleja nada, es que se le llama cuerpo negro. Lo que se estudia y se mide es la radiación que sale por el orificio, desde dentro de la

cavidad, y que está en equilibrio térmico con los átomos de las paredes internas.

A la gente de Ciencia, le hace ilusión que las cosas que se dicen con palabras o los resultados que describen un fenómeno, se puedan representar también en forma teórica; porque, aunque disfrutan de lo que observan, lo cierto es que disfrutan mucho más cuando logran comprender lo que está sucediendo. Como ya hemos visto antes, parte de esa comprensión la constituyen las expresiones matemáticas, que dan cuenta de los fenómenos que están siendo observados.

Ya he señalado que en la emisión del cuerpo negro, a medida que aumenta la temperatura, el color más intenso se va desplazando desde el rojo hacia el azul. Si se quiere poner estos resultados en un gráfico, habría que dibujar una especie de cerrito; los colores estarían representados en el eje horizontal y la energía asociada a cada color en el eje vertical (en rigor, se representa la longitud de onda versus densidad de energía). Si el objeto está tan caliente, que se ve rojo, la cima del cerrito (máximo en el gráfico) estará encima del color rojo; si el objeto está aún más caliente y se ve azul, el máximo aparecerá en el azul. Es importante darse cuenta, que la radiación del cuerpo negro es continua, es decir, que no aparecen líneas.

Varios respetables científicos trataron de explicar, a través de expresiones matemáticas, el comportamiento del cuerpo negro. Un éxito importante lo tuvo Wilhelm Wien, quien dedujo una fórmula que permitía predecir a qué color (longitud de onda) correspondía la máxima intensidad emitida para cada temperatura. Sin embargo, no lograban encontrar una expresión matemática adecuada, que permitiese predecir la curva de emisión completa (el perfil del cerrito formado) para cada temperatura, y que fuese consistente con los conocimientos que se tenían de la materia en esa época.

Rayleigh y Jeans propusieron una ecuación que se ajustaba bien a los resultados en la zona infrarroja, pero,

a medida que se desplazaba hacia los colores visibles, la curva teórica se alejaba de la experimental, y en la zona ultravioleta predecía valores tan absurdos, que en esa región del espectro, la predicción teórica se les hacía infinita. ¡Plop! Sólo se trataba de cuantificar la energía emitida por una caja negra con una cavidad en su interior y un orificio que conectaba la cavidad con el exterior, ¿cómo ese artefacto iba a emitir energía infinita?

Como los físicos (gente muy creativa) estaban impactados por esta predicción que ocurría en la zona ultravioleta del espectro, y que además de inadecuada era absurda; la bautizaron como “la catástrofe ultravioleta”.

Para explicar el fenómeno, los científicos habían realizado un desarrollo matemático consistente dentro del marco conceptual de la Física clásica, sin embargo (ellos no lo sabían en ese momento), la explicación para la radiación del cuerpo negro se escapa del marco de la Física clásica, porque la realidad a nivel atómico es muy diferente de aquella que podemos percibir en forma cotidiana. Y es que el mundo que nos rodea, lo percibimos como continuo; percibir y explicar lo que nos rodea como un continuo, es lo que se llama Física clásica. Por ejemplo, si yo deseo ir desde la esquina de mi calle hasta la cocina de mi casa, lo que haré es recorrer un trayecto continuo; no puedo estar en la esquina y aparecer sin más en la cocina.

Los cuantos de Planck o los fotones de Einstein

En 1900, después de haber librado por años sus propias batallas con el cuerpo negro, Max Planck, propuso como solución, algo que hasta él mismo consideraba ilógico; esto es, que la energía al interior de la cavidad estaba distribuida en paquetes, que él llamó “cuantos”. En este modelo, la energía ya no es continua. Algunas energías son posibles y otras no. Lo genial, era que al aplicar esta consideración innovadora (pero rara), el resultado

coincidía con lo que se observaba experimentalmente; lo triste, era que tanto a Planck como a sus contemporáneos, les parecía que la solución encontrada era práctica, pero que no tenía ningún sentido físico. De hecho, los siguientes 5 años, la comunidad científica no encontró que el planteamiento de Planck fuese ni interesante ni adecuado. Hasta 1905, en que Einstein utilizó estos paquetes de energía para decir, que bajo ciertas condiciones, “los cuantos” (que después serían llamados fotones), eran corpúsculos (es decir, partículas) que podían golpear una placa metálica, como lo haría una “piedrecilla”, y podían arrancar electrones a ese metal.

Einstein utilizó el concepto de estas partículas de luz, para dar explicación a lo que se conoce como “efecto fotoeléctrico”, y que constituye el principio por el cual funcionan las luminarias de la calle y se mantienen abiertas las puertas de los ascensores, cuando entramos o salimos de ellos. Esa fue la razón, por la que Einstein recibió el Premio Nobel en 1921.

Había nacido la Mecánica Cuántica. De allí en adelante, se entendería que la radiación electromagnética puede comportarse como onda y como partícula. No obstante, Planck tardó años en aceptar que el mundo, a nivel atómico, fuese cuántico; no lograba entenderlo. No le he preguntado a Alen qué opina al respecto, pero sólo por ese hecho, a mí, Planck me cae sumamente bien.

El hecho es que hay muchos ejemplos de objetos que irradian, como lo haría el cuerpo negro a cierta temperatura. Es el caso del Sol y las demás estrellas. Por el color del Sol, puede determinarse que la temperatura de su atmósfera (es decir, de su superficie) sea alrededor de 6000°K , y se sabe que las estrellas azules son más calientes, y las rojas más frías.

Llama la atención que las bases de la Mecánica Cuántica se hayan fundado en virtud de proponer una insólita solución a la radiación de cuerpo negro, y se hayan consolidado a partir del efecto fotoeléctrico; siendo el caso que los espectros de líneas de los elementos, que ya sugerían cuantización de la energía, habían sido descubiertos varias décadas antes. De

seguro este último comentario, tiene implícito el refrán que sostiene que “después de la batalla, todos somos generales”.

GALAXIAS QUE SE ALEJAN

¡Las galaxias son viajeras!
 ¡Unas de otras se alejan!
 Sus fotones lo reflejan,
 con elocuencia certera.
 Ay, si Doppler lo supiera
 En su tumba reiría.
 El universo crecía,
 Nunca había estado quieto.
 La ciencia escuchó el secreto
 y escribió la teoría.

El efecto Doppler en el sonido

Estudiando el efecto Doppler, se llegó a comprender que las galaxias se alejan. Christian Doppler, en 1842, planteó el efecto que tendría sobre el sonido, el hecho que la fuente que lo emite, se acerque o se aleje, de un observador externo. Nos familiarizaremos primero con el observador externo; diremos que se trata de Europio.

Europio está quieto en una esquina mirando los vehículos que pasan, no de aburrido, no de soñador, sino porque, después de 8 meses cesante, consiguió un empleo de media jornada, donde su función consiste en avisarles a los conductores de la locomoción colectiva, los intervalos de tiempo entre un autobús y el siguiente. Cada día,

entre las 10 y 11 de la noche, Europio escucha que por la calle principal, se acerca una ambulancia de una clínica cardiológica con la sirena en funcionamiento. De tanto escuchar la sirena a la misma hora, y con el mismo destino, Europio ha llegado a dos conclusiones: la primera es que el asunto de la ambulancia es un recurso publicitario, pues no puede ser que a Samario le venga un infarto a la misma hora y todos los días; la segunda conclusión, es que cuando la sirena se acerca, no sólo se le oye el sonido a mayor volumen, sino también más agudo que cuando se aleja.

Doppler planteó que, si una fuente de sonido se acerca, escuchamos ese sonido más agudo que cuando la fuente de sonido está detenida; cuando la fuente se aleja, lo escuchamos más grave. El efecto Doppler en el sonido, está ilustrado en la Figura N° 9.



Figura N° 9: Efecto Doppler en el sonido

Este cambio que le sucede al sonido, dependiendo si la fuente de sonido se acerca o se aleja, tiene que ver con que el sonido se comporta en forma ondulatoria. Como muestra la Figura N° 9: cuando la fuente se acerca, la longitud de onda del sonido se hace más corta, y el sonido mismo se vuelve más agudo; cuando la fuente se aleja, sucede el proceso contrario, y el sonido lo escuchamos más grave.

El efecto Doppler en fuentes de luz en movimiento

Doppler también se dedicaba a observar las estrellas y los fenómenos relacionados con la luz. Era cuestión de tiempo, unos años, para que advirtiese que a una fuente de luz en movimiento, se le podía aplicar el mismo efecto.

En la medida que avanzaba el siglo XX, cuando se analizaba la luz de nuevas estrellas, estudiando sus espectros; se observaba que aparecían nuevos conjuntos de líneas negras, en distintas zonas del espectro de radiación electromagnética. Como aparecían en distintas zonas, se pensaba que esas estrellas estaban compuestas de elementos químicos desconocidos. Sin embargo, cuando quedó claro que la luz también podía experimentar efecto Doppler; se concluyó que podía tratarse de conjuntos de líneas espectrales de elementos ya conocidos, que sólo estaban desplazadas hacia la zona roja del espectro, y que eso tenía mucho sentido si la estrella que se estaba estudiando, ¡se estaba alejando de nosotros!

En el efecto Doppler aplicado a la luz, cuando la fuente se acerca, la longitud de onda de la luz disminuirá, desplazándose a la zona azul; donde aparecerán ahora las líneas espectrales, como se observa en la Figura N° 10.

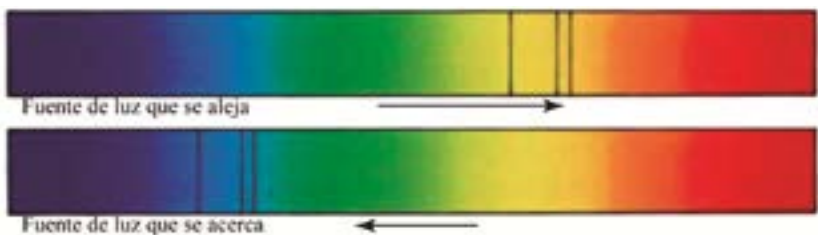


Figura N° 10: Efecto Doppler en la luz

Si ha escuchado decir que las galaxias se alejan, ahora podrá argumentar que la evidencia científica para sostener que aquello ocurre, está basada en los análisis que se le hacen a la luz que proviene de ellas; porque los espectros

de su luz, aparecen desplazados al rojo. A esto, también se le llama "corrimiento hacia el rojo". No obstante, hay que ser cautos. En el próximo capítulo voy a comentar las principales ideas en torno a la Teoría del Big Bang y a la evolución del Universo; veremos cómo se hace necesario, una y otra vez, revisar las interpretaciones vigentes de los parámetros medidos, ya que el corrimiento hacia el rojo experimentado por la luz que proviene de las galaxias, podría no ser consecuencia del efecto Doppler, sino de otro fenómeno que le acontece al Universo mismo.



“Alen, que de pequeña adoraba la luz del día, no llegaba a sentir una particular atracción por el cielo nocturno. Aunque hubo circunstancias en que eso pudo haber cambiado”

HISTORIA DE LA MUCHACHA QUE SE IBA A DORMIR MUY TARDE

Alen creció de repente. Esta chiquilla es un personaje ficticio, por eso puede crecer de repente; lo que no logra uno explicarse, es... ¿cómo es que los hijos crecen de repente?

Ciertamente, cuando Alen era una muchacha, acostumbraba como tantas otras chicas de su edad, a estar enamorada, y en esos trances llegó a tener una suerte de amigo con ventaja; la suerte, desde luego, era para él, pero Palurdo (como quedará enteramente demostrado) nunca supo darse cuenta.

Alen, que de pequeña adoraba la luz del día, no llegaba a sentir una particular atracción por el cielo nocturno. Aunque hubo circunstancias en que eso pudo haber cambiado.

Era de noche y allí estaban; Alen y Palurdo en la playa.

El amor, la noche y la playa, suelen llevarse bien. Sobre ellos, la Vía Láctea en pleno, les hacía unos guiños maliciosos. Noche, playa, cielo; ¿será que no me amas?

Él señaló la estrella más brillante. «Sirio –le dijo– ¿la vez?»

Obvio que Alen la veía, pero no podía responder algo como «¿me estoy embromando?».

—Claro que la veo... —respondió, simulando la voz más dulce y bobalicona que le fue posible, y de paso, pensando que era el prelude de algún comentario mucho más romántico por hacer.

Esta es la parte en que a Palurdo se le notó que nunca había asistido al curso rápido de las tres T: tino, tacto y ternura. Y frente a susurros, Alen puso oído atento.

—Esa es la estrella que le regalé a la Hermenegilda.

Habiendo tantas estrellas en el cielo, y Palurdo justo tenía que señalarle la que le regaló a esa muchacha (que después sería su esposa).

Alen se dijo, «Maldita Hermenegilda». Sin embargo, con el paso de los años, cuando recordaba ese momento, no podía sino pensar «Pobre Hermenegilda»; la cantidad de veces que habrá sido víctima de la falta de tino, de tacto y de ternura.

De esa noche, el resto fue un completo fracaso. No fue aquella la ocasión en que Alen se enamoró del cielo. Por entonces, su ignorancia era grande, tanto, que al mirar el firmamento y ver la Vía Láctea, ella pensó que aquel enjambre de estrellas, era todo el Universo disponible.

CONCEPTOS CLAVE: Teoría Estándar del Big Bang con etapa inflacionaria, Tiempo de Planck, Longitud de Planck, Fluctuación cuántica del vacío, Velocidad de la luz, Relatividad Especial, Relatividad General, Sistema de referencia inercial, Fusión nuclear de hidrógeno, Cadena protón-protón, Defecto de masa, Espacio-tiempo, Principio de equivalencia, Geodésica, Constante cosmológica, Parámetro de Hubble, Principio cosmológico, Cefeidas variables, Radiación de fondo de microondas, Problema del horizonte, Planitud, Materia Oscura, Energía oscura.

3

La teoría del Big Bang

“Los niños habían de recordar por el resto de su vida la augusta solemnidad con que su padre se sentó a la cabecera de la mesa, temblando de fiebre, devastado por la prolongada vigilia y por el encono de su imaginación, y les reveló su descubrimiento.

—La tierra es redonda como una naranja...”

Cien años de soledad

Gabriel García Márquez

ASIMILANDO QUE HABITAMOS UN MUNDO EXTRAÑO

Casi por la misma época en que me dijeron que el viejito pascuero no existía, todavía en edad preescolar, hube de vivir la misma extraña experiencia, a la que José Arcadio Buendía sometió a sus hijos en el inolvidable Macondo; mis hermanos me dijeron que la Tierra era redonda.

Cada año, cuando se acercaba la navidad, me preocupaba profundamente al escuchar las mentiras de mis padres; que pórtate bien, que el viejito, que los regalos, en fin... en cambio los meses restantes, mi preocupación estaba centrada en los chinos; porque viviendo los chinos al otro lado del mundo, los imaginaba con los pies arriba, caminando apoyados sobre sus manos, y pensaba que aquello debía ser agotador. A la larga, entendí que no hay una ley natural entre la atracción gravitatoria y los circos de acróbatas chinos; después de un par de lustros, también llegué a entender los argumentos para sostener que la Tierra es redonda y, aunque el ciclo de la vida se encargó de traer de vuelta al viejito pascuero en gloria y majestad, llegó el día en que hube de renunciar a ese “chico de rojo”, que fue cuando escuché a mis hijos susurrando «¿le decimos o esperamos hasta el próximo año?».

Ahora bien, siendo el propósito de este libro un tema científico serio, es posible que este preámbulo

le resulte desconcertante, sin embargo, cumple con el propósito de confesar que soy una de esas personas que asimilan lentamente el conocimiento. He tomado alguna consciencia de la profundidad y aridez de los temas que vamos a tratar y, con eso en mente, me he propuesto como objetivo que usted, mediante su lectura, llegue a percibir (como yo lo he hecho), que allí donde había una muralla infranqueable, se ha abierto una pequeña puerta, y aunque en rigor no se nos invita a pasar porque dentro están todos muy ocupados para andar haciendo de anfitriones, sí se nos permite al menos, dar una miradita.

Le anticipo que lo que verá es hermoso, pero rarísimo; consistente, pero para nada intuitivo. Encontrarle un verdadero sentido, de seguro requiere adentrarse, y si usted es como yo (de procesamiento lento), le tomará su tiempo.

Este capítulo está dedicado a la Teoría del Big Bang y es un acercamiento a conocer lo que la Ciencia ha planteado sobre la evolución del Universo y, al mismo tiempo, nos aproxima a los acontecimientos históricos que desembocaron en la teoría, a los personajes principales y a las luchas de poder entre científicos; (pues cuando no es el dinero; la fuerza impulsora suele ser la pasión por el poder... y sí, aún en las mentes más brillantes).

La parte más extensa de este capítulo estará destinada a ilustrar de qué manera las consideraciones relativistas proporcionan un marco para la Teoría del Big Bang. Al final, analizaremos el aporte y la visión de la Mecánica Cuántica para el mismo fenómeno, y las modificaciones que ha debido sufrir, hasta llegar a conformar lo que actualmente se denomina Teoría Estándar del Big Bang con etapa inflacionaria. No se asuste el lector con lo recién enunciado; recuerde que este libro se precia de ser un relato.

COMENZANDO POR EL PRINCIPIO

El Big Bang en dos pinceladas

Se ha estimado que nuestro Universo comenzó hace unos 13.800 millones de años. Preguntarse qué había antes de eso, de acuerdo a la Ciencia, carece de sentido porque no existe un antes; a partir del Big Bang comenzó el espacio y comenzó el tiempo.

El desarrollo de la Teoría del Big Bang tiene su punto de partida en las primeras décadas del siglo XX. Como el propio Universo también ha evolucionado, y aunque el proceso ha sido rápido, lo cierto es que aún no está todo dicho. Desde luego hay un actor principal; Albert Einstein. Él tuvo un rol protagónico al formular la Teoría de la Relatividad, también tuvo otro papel de considerable importancia en los inicios de la Mecánica Cuántica, con el descubrimiento del efecto fotoeléctrico. Sin embargo, el curso que después tomaría la Teoría del Big Bang y el conocimiento actual del Universo, como veremos, es trabajo de muchos científicos.

La Teoría de la Relatividad General brinda una descripción del Universo a gran escala y es el marco teórico de la Teoría del Big Bang, sin embargo, proponer una secuencia de los procesos que debieron producirse a escala atómica y subatómica desde los primeros minutos... o en otras palabras, la creación de materia; ha sido labor de la Mecánica Cuántica.

La Teoría de la Relatividad General fue formulada en 1915, y aunque el desarrollo de sus ecuaciones predecía algo distinto, Einstein sostenía que el Universo debía ser estático; no apoyaba en absoluto la idea que el Universo se expandiese, y menos que hubiese tenido un punto de partida; en menos de 15 años, la evidencia mostró que las cosas no eran tan parecidas a como él las imaginaba, o al menos, eso fue lo que pensaron todos. Recién en 1970, Stephen Hawking y Roger Penrose demostraron

que (según la Teoría de la Relatividad) el Universo habría surgido de una singularidad; un estado extremo en que las propiedades, por ejemplo la densidad, se hacen infinitas. Hasta ese punto funciona el modelo teórico; llega el instante en que la descripción deja de tener sentido físico para las teorías actuales porque las propiedades se hacen infinitas. Vale decir, ni la Mecánica Cuántica ni la Teoría de la Relatividad pueden dar cuenta del instante cero del Universo. Como veremos, la Relatividad describe la gravedad donde ella tiene peso, en el ámbito de estructuras grandes; la Mecánica Cuántica describe interacciones a nivel de partículas donde la gravedad es una fuerza débil que carece de importancia. Si la singularidad es un punto de densidad infinita, se requeriría una teoría distinta para abordarlo y hace años se está en búsqueda de una teoría de la Gravedad Cuántica, que como se dijo en el capítulo I, a la fecha no existe.

De acuerdo a la teoría, el tiempo y el espacio surgen con el Big Bang; luego hay un lapso pequeñísimo, conocido como "tiempo de Planck", a partir del cual los parámetros tienen sentido físico (la distancia del Universo de un extremo a otro, en el tiempo de Planck, habría sido 1×10^{-35} metros; y es conocida como "longitud de Planck"). Se ha determinado que la altísima temperatura que satisfaría esa condición (que no es infinita, como uno podría imaginar a priori) tiene un valor del orden de 1×10^{32} grados; y esa habría sido la temperatura del minúsculo Universo. Después, (siempre en lapsos brevísimos) pasaron más cosas; el Universo emergente se infló, ¡se expandió vacío!, las fuerzas de la naturaleza que antes estaban unidas, se fueron separando. Mientras la temperatura descendía de manera desmesurada, y como resultado de algo que le pasa al vacío, llamado "fluctuación cuántica del vacío"; en distintos puntos de ese vacío, surgió la materia. Más tarde, tuvo lugar la evolución del Universo. Esta cosmovisión, que muy cerca del origen supone una etapa de expansión desmesurada, se llama Teoría Inflacionaria.

Por favor mire su reloj; el nacimiento del Universo habría durado aproximadamente unos tres minutos. Después de media hora, tras descender dramáticamente, la temperatura se habría estabilizado, y luego habría habido 380.000 años de oscuridad (ya que la luz no podía escapar de las incesantes interacciones con los electrones, que a tan alta temperatura, aún no formaban parte de los átomos).

Todo lo dicho suena sumamente especulativo, no obstante, existe evidencia que permite sostener que la teoría es razonable; que muy probablemente, esa fue la forma en que ocurrieron los fenómenos, y que éstos admiten explicar que el Universo sea como lo observamos.

El funcionario en una oficina de patentes: “ese tranquilo claustro”

Si nos remontamos a los locos años veinte, nos encontramos con que Albert Einstein (haya o no bailado charleston) ya había formulado la Teoría de la Relatividad General. Ante la razonable pregunta de: ¿Qué tiene que ver aquí la Teoría de la Relatividad General? La respuesta es; mucho. Einstein estaba obsesionado con describir y entender el funcionamiento del Universo. Eso es lo que explica la Teoría de la Relatividad General; a la que se dedicó durante los años que trabajaba en una oficina de patentes en Berna. Surge la duda de saber si en verdad se patentaban inventos a diario; pero a la luz de que Einstein lo llamaba “ese tranquilo claustro”, podría uno suponer, que no era demasiado el movimiento.

Las leyes fundamentales del movimiento y de la gravedad, descubiertas por Isaac Newton en 1687, y su máxima expresión a través de la ley de gravitación universal, constituyen una buena aproximación a la descripción del Universo; sin embargo, la Teoría de la

Relatividad General proporciona resultados más exactos y acierta en sus predicciones, allí donde la Mecánica Clásica comienza a presentar fallos.

Ahora cabe preguntarnos; ¿Cuáles fueron las grietas que vislumbró Einstein en la Física Newtoniana, para buscar respuestas diferentes? Porque el problema de aplicar las leyes de Newton, no está en los resultados. Las condiciones en que realmente se manifiestan las diferencias relativistas son bastante extremas, y como los cálculos son mucho más complejos, no se justifica complicarnos la vida cotidiana con la relatividad; no es necesario, porque a velocidades mucho menores que la de la luz, las fórmulas relativistas se reducen a las que estableció Newton.

En el marco conceptual de Newton, existe un espacio absoluto y un tiempo absoluto, que coinciden con la experiencia cotidiana de espacio y tiempo. La Física antes de Einstein, apelaba a la existencia del éter. Se suponía que existía una sustancia presente en todo el Universo que se encontraba en reposo en el espacio absoluto. El sonido requiere de un medio para propagarse, normalmente el aire. Se consideraba que la luz viajaba a través del éter; como el sonido viaja a través del aire. Albert Michelson, a partir de 1881 (teniendo 28 años), planificó y realizó un cuidadoso experimento que le permitió medir la velocidad de la luz en diferentes direcciones, obteniendo siempre el mismo resultado. Algunos años después, trabajando con Edward Morley, realizaron el experimento con mayor precisión aún y determinaron que la velocidad de la luz es constante. Eso hacía pensar que la existencia del éter no era necesaria.

En términos de la vida cotidiana, el movimiento de vehículos en carreteras, de barcos en el océano, de aviones, de naves enviadas al espacio, incluso el movimiento de la mayoría de los planetas de nuestro Sistema Solar; puede ser comprendido y predicho adecuadamente utilizando las leyes de Newton. Las

consideraciones de la relatividad adquieren relevancia a velocidades cercanas a la de la luz y en la escala de objetos verdaderamente masivos (como el Sol, por ejemplo). Ahora bien, Einstein era un poquito “cuático”; porque a falta de una, propuso dos Teorías de la Relatividad: la Relatividad Especial y la Relatividad General.

El caso especial de la Relatividad Especial

Es especial porque se refiere al caso “especial” de movimiento rectilíneo uniforme, o sea al movimiento a velocidad constante sin cambiar de dirección.

En el siglo XVI, Galileo había planteado un principio de relatividad que establecía que: “las leyes de la Mecánica son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales”. El primer postulado de la teoría de la Relatividad Especial de Einstein, es similar al de Galileo, pero contiene una profunda diferencia; Einstein también incluye a la radiación electromagnética (la luz).

Postulado Uno - Principio de Relatividad: Las leyes de la Física (la Mecánica y el Electromagnetismo) son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales.

¿Notó la diferencia? Galileo habla de las leyes de la Mecánica, del movimiento de los cuerpos; Einstein incluye a la luz. De acuerdo a este postulado, no existe un marco de referencia más “correcto” que otro u otros. Ningún sistema de referencia inercial es privilegiado, ni puede arrogarse la propiedad del reposo absoluto. Pero, ¿en qué consiste un sistema de referencia inercial? Lo que describiré a continuación, es un experimento virtual que fue descrito, primero por Galileo; se trata de un grupo de viajeros encerrados en un barco, sin posibilidad de mirar hacia afuera (Einstein puso su equipo de colaboradores virtuales a viajar en un tren). Por razones de presupuesto,

los viajeros de este ejemplo usarán la locomoción colectiva.

Un sistema de referencia inercial es aquel en que no se puede distinguir, a partir de experimentos realizados en su interior, si el sistema está en reposo o en movimiento rectilíneo, a velocidad constante. Los experimentos físicos que se realicen en él, tendrán, para el observador en su interior, los mismos resultados; tanto si está en reposo, como si el vehículo se mueve a velocidad constante y en línea recta. Si cree que lo anterior es complicado de probar, le sugiero realizar la siguiente experiencia virtual. Siéntese en una silla del comedor de su casa con una pelota de malabarista en la mano, láncela hacia arriba y espere que caiga en su mano. Ahora, imagine que sus amigos le gastan una broma: le vendan la vista, lo hacen dormir, lo ponen arriba de una micro con la vista vendada, decoran la micro como si fuese el comedor de su casa, hacen que la micro avance a velocidad constante, le retiran la venda y le dicen que lance la pelota hacia arriba. La pregunta es: ¿cree que la pelota caerá en su mano? Recuerde que, aunque usted no lo sabe, el vehículo está en movimiento. (Y no es necesario que salga a tomar micro; utilice su experiencia previa). Tenga en cuenta que la experiencia es virtual y todo ha sido idealizado; es decir, el motor de la micro no hace ruido; en la calle no hay eventos, o sea no hay hoyos; sus amigos no tienen el dinero para decorar la micro, pero su casa es minimalista; y ninguno se aprovecha de que usted estuvo durmiendo para hacerle cosas desagradables, como tatuajes en el rostro o depilación total de cejas; y por supuesto, nadie intenta robarle nada. Nada; esa es la palabra... Nada le permite saber que está arriba de una micro en movimiento.

Si usted admite que no tiene forma de saber que se encuentra en movimiento rectilíneo uniforme o en reposo, porque en ambos casos, luego de lanzar la pelota hacia arriba, ésta cae en sus manos; entonces usted ha captado

la idea de lo que es un sistema de referencia inercial, porque (como ya se dijo), en él no se puede distinguir a partir de experimentos realizados en su interior, si se está en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme.

Postulado Dos: El valor de la velocidad de la luz es constante, independiente del movimiento de la fuente de luz.

Nada hay más rápido que la luz, y en el vacío alcanza su velocidad máxima; $c = 300$ mil km/s. No existe un sistema de referencia en reposo absoluto, por lo tanto, no se precisa del éter.

Suponga un tren en movimiento a 100 km/hora. Entonces, una persona sale corriendo desde el último carro hasta la locomotora, a 15 km/hora (por puro gusto no más, a lo Forrest Gump). Un observador que mira desde los campos aledaños (y que gusta hacer cuentas, porque si no, no sería un observador; sería un ocioso, aunque a veces es lo mismo), notará que, desde su punto de vista, a la velocidad del corredor debe sumarle la velocidad del tren, para que el resultado tenga sentido para él.

Entonces:

Velocidad del corredor respecto a un pasajero sentado en el tren: 15 km/hora.

Velocidad del corredor respecto al observador campesino curioso: $100\text{km/hora} + 15\text{Km/hora}$.

Esta operación de sumar velocidades (o restarlas si se corre en sentido contrario) al avance del vehículo, hay que hacerla siempre; excepto, cuando se trata de la luz. En el caso de la luz, cuando sale del foco de un tren en

movimiento, su nueva velocidad sigue siendo la misma (no se le suma la velocidad del tren, porque ni la luz puede ir más rápido que la velocidad de la luz). Hay un asunto simpático (que fue explicado en detalle en el capítulo II). La luz que sale del tren hacia adelante, no puede ir más rápido que “c”, sin embargo, a esa luz le pasan cosas que dependen de si el tren se acerca o se aleja del observador ocioso que contempla desde la llanura, aquello se llama efecto Doppler.

Todos los análisis de la teoría de la Relatividad Especial son hechos a velocidades cercanas a la de la luz, porque además del efecto Doppler; en esas condiciones, también suceden algunas cosas extrañas que llevan a conclusiones... aún más extrañas. Al revisar cómo fue que se llegó a tales conclusiones extrañas, hay que mencionar que, a la nascente teoría de la Relatividad Especial, le “prestó ropa” el teorema de Pitágoras. ¿Lo recuerdan? Ese que habla de un triángulo rectángulo, de los catetos y la línea diagonal que cierra el triángulo uniendo los catetos, llamada hipotenusa (donde se cumple que al elevar al cuadrado la longitud de cada cateto y sumar esos valores, da el mismo resultado que elevar al cuadrado la longitud de la hipotenusa). Aún sin recordar el teorema, basta con dibujar un triángulo rectángulo, para darse cuenta que la hipotenusa es siempre el lado más largo de los tres. Con esa geometría sencilla se puede realizar el siguiente experimento “pensado”, que es el fundamento de la Relatividad Especial. Para entenderlo, se requiere seguir el hilo conductor hacia un absurdo casi surrealista (porque ninguna parte del experimento podría hacerse en la práctica).

Se propone una actividad experimental “pensada”, que será realizada por Europio (el que trabajaba media jornada en la locomoción colectiva en el capítulo II y que se dio cuenta del efecto Doppler en el sonido, con la colaboración de Samario, su amigo entrañable).

Experimento:

1. Suponga que una nave se desplaza horizontalmente hacia la derecha, a una velocidad cercana a la de la luz (porque estos problemas ocurren a velocidades grandes... realmente grandes).
2. Suponga que la nave es transparente, y que también hay un observador externo, que puede ver desde fuera el experimento.
3. En la cabina de la nave hay un foco en el piso, y justo arriba de él (en el techo de la nave) hay un espejo.

Europio ganó el premio mayor de la lotería y gastó todo el dinero en un viaje espacial (razón que hizo enojar a todos sus amigos).

Europio ha tenido tiempo para sí mismo y se ha vuelto muy narcisista. Cuando vio que en la cabina de la nave había una fuente de luz en el piso, frente a un espejo ubicado en el techo, supuso que era para fotografiarse con iluminación desde abajo (para que no se le notasen las arrugas). Se estuvo tomando "selfies" varios días, hasta que le explicaron desde Houston, que el propósito de la luz en el espejo era hacer un experimento.

4. El trabajo experimental de Europio consistiría en medir, con un cronómetro muy preciso, el tiempo que tardaba en salir un haz de luz, desde la ampolleta del piso hasta que se reflejaba en el espejo del techo.

Nota: Si se quisiera que en el experimento, el viaje de la luz (desde el piso hasta el techo) durase un segundo; la separación entre el piso y el techo debería ser de 300.000 km, por eso afirmé al comienzo, que el experimento es surrealista.

Europio no tenía inconveniente en medir tiempos (había subsistido años trabajando para la locomoción colectiva, donde no hacía otra cosa que medir e informar el tiempo,

entre una micro y la siguiente), pero no le agradaba ese gustito a “dèjà vu” que estaba teniendo aquella experiencia. Sin embargo, en la nave iba a velocidad constante y libre de gravedad, por tanto no hacía otra cosa que flotar; empezaba a pensar, que ser millonario no lo libera a uno de preguntarse por el sentido de la vida; empezaba a pensar, que quizá sus amigos tenían razón, y había despilfarrado su buena fortuna.

Algo más complicado fue el problema que tuvo el observador externo (Samarío), que se quedó con el trabajo de Europio, después que aquel se ganó la lotería.

5. El caso es que, en virtud de su experiencia como cronometrador, Samarío fue invitado por la NASA, a colaborar en mediciones de tiempo del mismo experimento (desde un laboratorio en la Tierra). A decir verdad, Samarío (muy prolijo en sus mediciones) la pasó mucho mejor que Europio, porque tomó nota de que en el experimento sucedía una rareza, y porque pensó que sólo él se estaba dando cuenta, sintió que estaba descubriendo algo nuevo (cuestión que suele ser muy estimulante).

Hasta aquí, el desarrollo del experimento “pensado”, ahora veamos qué sucede con los resultados:

Lo que Samarío observó fue que, si bien era verdad el reporte de Europio (que veía en la cabina el haz de luz ir desde abajo hacia arriba), sucedía que, en forma simultánea, la nave se desplazaba horizontalmente hacia la derecha. Entonces él, que estaba afuera y en reposo, veía desde su punto de vista, que el recorrido de la luz ¡no era para nada vertical! Él veía, que durante el recorrido de la luz (que salía desde el foco en el piso, hasta alcanzar el espejo en la parte superior), la nave, simultáneamente, iba avanzando hacia adelante. «Para que la luz que sale del foco, pueda reflejarse en el espejo –pensaba Samarío–, debe desplazarse hacia arriba, pero también hacia

adelante, porque se va moviendo con la nave (como se mueven con el metro, las pelotas con que juega un malabarista en su interior), es decir, la luz realiza una trayectoria diagonal».

«Lo que yo veo, es que la luz hace un recorrido desde el foco hacia el espejo, ¡pero en diagonal!» Eso fue lo que Samario gritó (casi en estado de éxtasis) al traductor de Houston que atendió la llamada.

En el triángulo que se ve a continuación; la línea horizontal B, representa la distancia recorrida por la nave durante el experimento; la línea vertical A, es la distancia que recorre la luz (según Europeo, dentro de la nave), en un tiempo t.

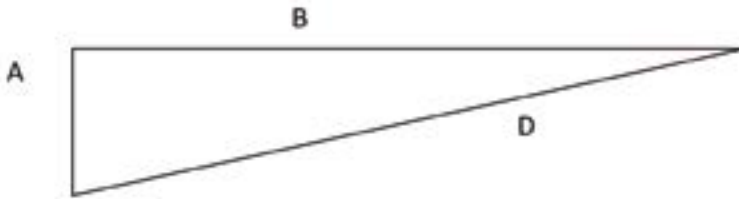


Figura N° 11

D, que es la hipotenusa del triángulo (o sea, la línea diagonal), es el camino que recorre la luz, según Samario. Claramente esa distancia, no es igual que la considerada por Europeo en el mismo experimento.

Sabiendo que la velocidad de la luz es la misma y que es máxima en ambas observaciones, si las distancias son distintas, los tiempos también deberían ser distintos; ambos resultados son válidos, pero no iguales, y Einstein fue el primero en darse cuenta. Como la hipotenusa es el recorrido más largo, el tiempo medido por Samario ha de ser mayor que el tiempo medido por Europeo y, dado que la relación se produce en un triángulo rectángulo, para determinar cómo se relaciona el tiempo medido por

Europio con aquel medido por Samario, se puede hacer uso del teorema de Pitágoras.

Europio observa su reloj y ve que marca "t" segundos; Samario (que también observa su reloj) ve que marca "T" segundos; los tiempos no son iguales. Para colmo, Samario se da cuenta que en la Tierra ha pasado más tiempo que en la nave, y sin poder creer lo que está viendo, exclama: «¡En la nave, a Europio le pasa más lento el tiempo!» No imagine el lector que ha habido un error tipográfico, ambas letras ("t" y "T") son diferentes, son tiempos distintos que son propios de cada observador en su sistema de referencia... en la Física newtoniana, en el mundo como lo percibimos, el tiempo es absoluto y es el mismo para todos; en el Universo relativista de Einstein, no lo es.

A medida que la velocidad de la nave aumenta (acercándose a la velocidad de la luz), "T" (el tiempo medido y vivido, por el observador "en reposo") se hace cada vez mayor a "t" (el tiempo medido y vivido, por el observador en movimiento en la nave). Los dos tiempos no son iguales. Sin embargo, el viajero de la nave (Europio) no nota que los segundos en su reloj ahora duran más; son más largos. Él no tiene cómo darse cuenta. No se trata de que Europio se mueva en cámara lenta, sino que todo ocurre más lento (en su propio tiempo).

El observador externo, nota que para él pasan tiempos numéricamente grandes, por ejemplo, varios días, y mira el reloj que hay en la nave (recuerde que en este experimento pensado, la nave es transparente), y para él, ese reloj se tarda mucho en pasar de un segundo al siguiente. Entonces, cuando se viaja a velocidades cercanas a la de la luz, ¿el tiempo pasa más lento? Correcto, así es.

Un análisis similar puede hacerse para la distancia recorrida, ya que a medida que alguien se acerca a la velocidad de la luz; la distancia se contrae, es decir, se va

haciendo cada vez más corta, hasta que (llegando a la velocidad de la luz) la distancia desaparece.

Según la teoría de la Relatividad Especial, el espacio y el tiempo están sumamente comprometidos, tanto que en adelante ya no se hablará del espacio y del tiempo; sino del espacio-tiempo. Si el espacio sufre, el tiempo sufre; si el espacio se emociona, el tiempo se conmueve... en fin. Se concluye que, a medida que un observador se acerca a la velocidad de la luz; la distancia se haría cada vez más corta, el tiempo se dilataría y la masa inercial (es decir, la resistencia que opone un cuerpo a ser acelerado) iría en aumento. A la velocidad de la luz, el tiempo se hace tan lento, que deja de transcurrir; la distancia se hace tan corta, que desaparece; y la masa inercial aumenta, hasta hacerse infinita. Para colmo, al viajero no le ayudarían ni el reloj ni la huincha, para darse cuenta que esto está sucediendo, porque él no percibe cambios... Sólo otro observador desde fuera (por ejemplo, desde la Tierra) podría visualizar y tomar nota de lo que le pasa. Si se diera el caso que los dos involucrados fuesen gemelos, estaríamos hablando de la "paradoja de los gemelos": el gemelo que se quedó en casa, se casó, tuvo siete hijos, quedó viudo, y de aburrido se dejó barba; en tanto, el que salió a dar una vuelta a velocidad casi lumínica (velocidad de la luz), sólo envejeció unos años y también se dejó barba, pero porque la máquina de afeitar se le quedó en casa, y porque así, es como dicen que funcionan los gemelos idénticos.

Tome nota de esto; los gemelos sólo tienen la misma edad en un mundo de Física clásica, no relativista; en la Física de Newton. Si cualquiera de los dos viaja a velocidades cercanas a la de la luz, la situación se vuelve relativista, el tiempo de uno será diferente al del otro, y si se reencuentran, tendrán edades diferentes.

Bastaría con que todo el problema se redujese a lo expuesto, porque bastante trabajo le da a uno entenderlo... pero no es así. De acuerdo a la Relatividad Especial (debido a que no hay observador privilegiado), lo sucedido

pudo ser perfectamente lo contrario; porque según la experiencia de quien está en la nave, él se percibe a sí mismo “en reposo” y ve que su hermano, con laboratorio y todo, es quien se aleja de él a una velocidad fantástica. Esto puede parecer extraño, pero es común percibir, cuando viajamos, que los árboles y las casas se mueven respecto al paisaje de fondo, aunque es nuestro vehículo el que está en movimiento. Si empatizamos con el gemelo de la nave, tenemos que aceptar que según su punto de vista, es el gemelo del laboratorio-móvil quien se mueve a velocidad casi lumínica; entonces, al gemelo del laboratorio-móvil, debiera pasarle el tiempo más lento; por poner un ejemplo arbitrario, esperemos que en el reloj del laboratorio-móvil pase un año y los hacemos reencontrarse. Repitiendo el análisis anterior, cuando vuelven a verse, el gemelo de la nave (que se considera a si mismo en reposo) ve que en su calendario han pasado muchos años, y que su gemelo del laboratorio-móvil apenas envejeció un año. Recordando que en el primer análisis ocurría justo lo contrario, se pregunta uno; ¿a cuál de los dos, el tiempo realmente le pasa más lento? Porque esto es contradictorio, es... una paradoja. Einstein planteó que la paradoja no podía resolverse mediante la Relatividad Especial, y como mencionaremos oportunamente, le encontró solución mediante la Relatividad General, estableciendo que el gemelo-viajero (de la nave) es quien permanece joven.

En las reacciones químicas no manda Simón; manda Lavoisier

Otra cuestión interesante (que también deriva de la Teoría Especial de la Relatividad) es, quizá, la segunda ecuación más famosa de todos los tiempos (asumiendo, y apostando, que la primera, seguramente ha de ser el propio teorema de Pitágoras), que es la siguiente; $E=mc^2$,

esto es, la ecuación que equipara masa y energía. Esta ecuación supone reacciones nucleares.

Sabemos que los átomos tienen neutrones y protones en el núcleo, y que externamente, sus núcleos están rodeados por electrones (ubicados en niveles). Los químicos, basamos nuestro contento en jugar con los electrones de valencia; que son electrones de los niveles más externos de los átomos. Las reacciones químicas ocurren, porque a los electrones más externos de los átomos (o sea, a los electrones de valencia) les pasan cosas; de repente, miran el entorno que se les presenta y ya no quieren estar solos; unas veces, deciden compartir como buenos amigos, una habitación remodelada con algún electrón de valencia de otro átomo; otras, deciden entregarse por entero, casi olvidándose de su átomo de origen; o bien, actúan tan posesivamente, que prácticamente secuestran un electrón de valencia de su vecino. Todo depende de cómo sea el vecino y de su propia circunstancia.

En términos observables, lo que podemos percibir, es que en las reacciones químicas pasan cosas interesantes, hermosas, útiles, inútiles, llamativas o tóxicas; por ejemplo, ¿han visto en YouTube la reacción conocida como “la serpiente de faraón”? Esa reacción cumple con varios calificativos de los antes mencionados, sobre todo en lo relativo a “tóxica”, por eso hay que resignarse a verla en YouTube. Y aunque al principio más bien parece el excremento del faraón, después de 20 segundos bien se gana el nombre que la hace famosa.

Es posible que estemos tan habituados a ciertas reacciones químicas, que ya no nos llamen la atención; encender cualquier combustible para calentar o cocinar, para nada nos parece un asunto atractivo, sin embargo, basta una noche en que se suspenda el suministro de energía eléctrica, para que podamos pasar horas mirando la luz de una vela; asimilando su olor, observando cómo se derrite o si la llama produce sombra. La Química

siempre puede maravillarnos, sin embargo, las reacciones anteriores están gobernadas por la ley de conservación de la Masa, promulgada por Lavoisier y expresada en su "Tratado Elemental de Química", en 1789; sólo 5 años antes que la Revolución Francesa, en su etapa conocida como "el Terror", lo condenase a la guillotina por enemistarse con el científico y revolucionario Jean Paul Marat, también conocido como "el amigo del pueblo".

Uno de los aspectos más atractivos de la Química, es que a menudo se pueden hacer comparaciones (casi siempre odiosas) con las relaciones que se dan entre personas. Por ejemplo, la forma en que los electrones de valencia son compartidos, define lo que se llama el "enlace químico". Que ese enlace permanezca, depende de su estabilidad, y si llegasen a presentarse las condiciones en que esos mismos átomos pudiesen participar en enlaces más estables, los enlaces presentes se romperán, y formarán con otros átomos, enlaces nuevos y diferentes.

¿No le recuerda la descripción anterior, ciertos procesos comunes a la naturaleza humana?

En el proceso de combustión, por ejemplo; se requiere combustible, comburente (normalmente el oxígeno), y cuando menos, chispa. Basta que haya chispa, para que esos dos (combustible y comburente) terminen abrazados por las llamas. Las analogías son inevitables, ¿no le parece?

En las reacciones químicas puede producirse energía; pero la cantidad, el tipo de átomos, y por tanto, la masa que resulta al final de la reacción, es exactamente la misma que al principio. Cuando se quema un combustible, la reacción química requiere energía para romper los enlaces que existen; a menudo, la chispa es suficiente para empezar a romper esos enlaces, y se libera energía al ir produciendo enlaces nuevos. Parte de la energía liberada se gasta en romper más enlaces de los reactantes, y otra parte, la usamos en entibiarnos las manitos y los pies. Ahora bien, si sumamos la masa de todos los componentes iniciales y la de todos los compuestos

finales (vapor, humo, gases, cenizas y reactivos sobrantes), veremos que la masa se conserva. Cuando se trata de cambios químicos, Lavoisier sigue teniendo razón.

Reacciones nucleares y la ecuación más famosa

Cuando hablamos de convertir masa en energía (o decimos que masa equivale a energía) desde la Teoría de la Relatividad, estamos pensando en masa que desaparece (primero está y después no está), porque se ha convertido completamente en energía, y en mucha. Este proceso tan escandaloso, no sucede en la periferia del átomo (como ocurre en el caso de las reacciones químicas), sino que sucede en sus zonas más íntimas (menos accesibles y más resguardadas); sucede en el núcleo. Por lo mismo, realmente no es terreno de la Química a secas, sino de la Química Nuclear, o si nos ponemos quisquillosos; de la Física Nuclear.

Existen varios tipos de reacciones nucleares que podríamos utilizar como ejemplo, sin embargo, vamos a centrar nuestro interés en la fusión nuclear del hidrógeno para producir helio. ¿La razón? Es que esa es la reacción, que está ocurriendo en el Sol en este preciso instante, y es la que permite entibiarse el lomo a las lagartijas en el veranito de san Juan (tibieza que las llena de esperanza, justo cuando parece que el invierno ha llegado para quedarse). ¿Cómo hace el Sol para convertir átomos de hidrogeno en helio? Para que se forme un átomo de helio, se requiere que cuatro átomos de hidrógeno se sometan a un proceso conocido como cadena protón-protón; una versión simplificada de la misma aparece en la Figura N° 12; esta reacción ocurre en el núcleo del Sol y requiere que la temperatura al centro de éste sea de unos 10 millones de grados.

¿Cómo se las arregló el Sol para llegar a 10 millones de grados? Hubo un momento, hace unos 4.600 millones de años, en que el Sol aún no era el Sol; era una gran

masa de gas en vías de ser una estrella, girando sobre sí misma y compactando el material que la formaría (que era mayoritariamente, hidrógeno; el mismo tipo de átomos que se había producido en el estallido inicial), aunque a decir verdad, la evidencia muestra que nuestro Sol (y todo nuestro Sistema Solar) se debió formar con el material surgido del estallido de alguna estrella previa (una supernova), y en el proceso (debido a la fuerza de gravedad) fue comprimiendo ese material cada vez más. A pura compresión, el Sol se calentó tanto que pudo llegar a los 10 millones de grados, y se habría seguido comprimiendo, de no ser porque a esa temperatura había energía suficiente para desencadenar una reacción nuclear: la fusión del hidrógeno. En ese proceso, los átomos de hidrógeno participantes, se olvidarían de sí mismos y terminarían convertidos en otro elemento; en helio.

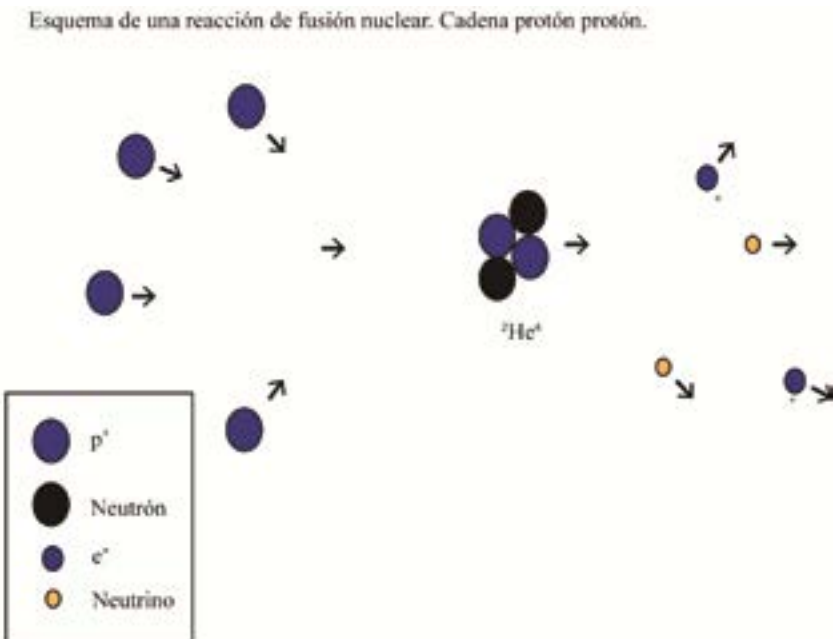


Figura N° 12: La cadena protón-protón

La figura 12 es un esquema simplificado de un proceso que ocurre en varias etapas. Al sumar la masa de protones y neutrones que componen el átomo de helio (cálculo teórico), y compararla con la masa del helio que se obtiene a partir de medidas experimentales, queda claro que al átomo de helio le falta masa. A esto se le llama "defecto de masa".

Si el helio tuviese mamá, de seguro ésta le reprocharía: «¿Dónde dejaste el resto de la masa?, átomo de moledera». Aunque en realidad se trata de una pequeña proporción de masa, y si mami o papi son relajados, capaz que no se dan ni cuenta; porque la que se pierde es sólo un 0,7% de masa. Que en realidad no se pierde; se transforma en energía.

¿Dónde se fue ese 0,7% de masa, aparentemente perdida? Pues bien, allí es donde entra en escena la famosa ecuación $E=mc^2$; esa pequeña cantidad de masa, debe usted multiplicarla por el cuadrado de la velocidad de la luz; las unidades resultantes, al hacer ese producto son unidades de energía, y no poca. En el Sol, cada segundo, casi 600 millones de toneladas de hidrógeno se fusionan en helio, convirtiendo ese 0,7% de diferencia (casi 4 millones de toneladas de materia) en energía.

Las estrellas brillan porque $E=mc^2$. Continuamente, unos átomos están experimentando fusión nuclear con otros átomos. En el proceso, una pequeña cantidad de masa desaparece, transformándose en energía que mantiene a la estrella brillando y permitiendo que el proceso continúe. Así es de hermoso. La vida en la Tierra es posible, porque en el Sol está sucediendo $E=mc^2$. Fue esta ecuación de Einstein (junto con el descubrimiento de las reacciones nucleares) lo que permitió a los científicos entender, qué era lo que se estaba "quemando" en el Sol. Mi humilde sugerencia es que, la próxima vez que vea una de esas pólizas estampadas con la cara de Einstein enseñando la lengua, recuerde el significado de esta

ecuación maravillosa, alce las manos hacia el padre Sol, y simplemente, agradezca.

Einstein no se había ganado la buena onda de sus profesores mientras era estudiante en el Instituto Politécnico de Zurich, no porque tuviese malas calificaciones, sino porque estudiaba lo que le gustaba, y a las demás cosas les restaba importancia. De hecho, uno de sus profesores (Hermann Minkowski) lo consideraba un holgazán, sin embargo, cuando Einstein publicó la Relatividad Especial en 1905, Minkowski quedó tan impresionado, que le dedicó a la recién nacida teoría, su tiempo de trabajo matemático, y en 1908 publicó sus ecuaciones, que daban cuenta del espacio-tiempo (que resulta ser cuatridimensional: son cuatro dimensiones, las tres primeras son espaciales, la cuarta es el tiempo), como una especie de tejido en el Universo.

A Einstein le apasionaba la Física, no tanto así las Matemáticas, pero a poco andar se dio cuenta, que el aporte de Minkowski era importantísimo, y prosiguió con su trabajo, para darle cauce a la Relatividad General.

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL

A continuación, encontrará cuatro párrafos cortos, pero intensos. El propósito es ayudarle a percibir esa atmósfera sustanciosa de conocimiento, que a dos décadas de avanzado el siglo XX; físicos, matemáticos y astrónomos, anhelaban saborear.

1. Un muy famoso astrónomo, toma muy en serio a Einstein

Había, por aquel entonces (cuando Einstein formuló la Teoría de la Relatividad General), un señor británico sumamente sabio, en lo que a Astronomía se refiere, tanto, que en 1930 (debido a sus valiosas contribuciones

en ese campo) la corona británica le otorgó el título de “Sir”. Téngase en cuenta que, en cuestiones de nobleza, la diferencia entre un Lord y un Sir, es que Lord se nace, en cambio un Sir se hace. La importancia de Sir Arthur Eddington para esta historia es, que fue él quien defendió y corroboró, la Teoría de la Relatividad General, haciendo mediciones experimentales que la comprobaban, durante un eclipse total de Sol en 1919.

2. Matemáticos y físicos dan “Me gusta” a las ecuaciones de Einstein

Las ecuaciones matemáticas asociadas a la Relatividad General, se llaman “ecuaciones de campo”, y varios físicos y matemáticos estaban en éxtasis con ellas. Uno de los embelesados fue el físico y meteorólogo ruso, Alexander Friedmann, cuyo trabajo matemático publicado en 1922, describía un Universo que podría expandirse. Eso disgustaba a Einstein, que era partidario de suponer (como la mayoría de sus contemporáneos) un Universo estático.

3. Einstein se manda feroz pifia

Considerando el párrafo anterior, en 1922 ya existían indicios de que todo podía haber comenzado con un Big Bang, pero, a pesar que no ponía en duda el trabajo matemático realizado por Friedmann, Einstein no estaba de acuerdo con las conclusiones que de ello se obtenían. Friedmann murió en 1925 (a la estupenda edad de 37 años), sin lograr convencerlo de lo contrario. Einstein pudo haberle tomado el peso a lo que Friedmann le estaba proponiendo (su visión del Universo), pero no lo hizo. Para el resto de la comunidad científica, en ese momento, la contribución de Friedmann pasó inadvertida.

4. Entre la Física, las Matemáticas y la fe

Sucedió que Georges Lemaître (físico, matemático y sacerdote belga), de tanto revisar las ecuaciones de campo de Einstein (como quien lee demasiadas novelas de caballería), y quizá también los trabajos publicados por Friedmann, le planteó a Einstein (en 1927, durante una conferencia en Bruselas) un modelo cosmológico que mostraba un Universo sensible de contraerse, al punto que se podía afirmar, que la materia habría surgido por el estallido del todo concentrado en un punto único; un “átomo primitivo”.

No se aflija, explicaré ordenadamente lo anterior. Pero antes debo preguntar: ¿puso atención a que Lemaître era sacerdote? Porque hay que decir, que después que Lemaître propuso su “átomo primitivo” (que a todas luces, es la idea madre de la “Teoría del Big Bang”), la comunidad científica asociada al tema, no se mostró para nada satisfecha con semejante idea. ¿Un átomo primitivo? ¡Un curita defendiendo la idea de que todo fue creado de la nada! Suena terriblemente religioso. Difícilmente lo tomarían en serio. Sin embargo, 5 años después, otros dos matemáticos norteamericanos (Robertson y Walker) también trabajaron con estas ecuaciones, y a partir de sus resultados, lograron describir posibles procesos en este Universo, cuyo tamaño no siempre habría sido el mismo.

Ocasionalmente, para referirse a la solución de estas ecuaciones se habla de “métrica de Friedmann”; otras veces, “métrica de Friedmann-Lemaître”; o bien “métrica de Robertson y Walker”; ello depende, de si el relato lo hace un europeo o un norteamericano. Una posible lectura a estas discrepancias (a la hora de reconocer el mérito de los autores), puede entenderse como una manera elocuente de echar mano al repertorio de mezquindades de la naturaleza humana. Sin embargo, a menudo, esta conceptualización matemática se denomina “métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker”

(que suena mucho más largo, pero habla mejor de la humanidad).

Aproximadamente en 1905, a Einstein le molestaba la descripción oficial del Universo. En ese momento se disponía del Universo descrito por Newton, y hasta hoy, si nos manejamos a velocidades razonables, basta con las leyes de Newton y su expresión de la gravitación universal, para describir adecuadamente el Sistema Solar y cuanto nos rodea. El problema es que Einstein (siendo harto más listo que la mayoría de nosotros), se daba cuenta que en determinadas condiciones, hacer uso de la ley de gravitación universal conducía a situaciones que no tenían sentido. Por ejemplo, Einstein se dio cuenta que aquella, presentaba un vacío que no se podía justificar; la aparente acción a distancia de la fuerza de gravedad.

Después de conocida la constancia en la velocidad de la luz, Einstein había postulado, que nada puede ser más rápido que la luz en el vacío. Eso significa, que ninguna acción entre dos cuerpos, puede ocurrir más rápido que la velocidad de la luz. Pero el Universo está lleno de estrellas y planetas, que crean grandes campos gravitacionales (que aparentan actuar a distancia), y él (Einstein) no encontraba la forma de incluir esos campos gravitacionales en su teoría, y con esa preocupación se fue a dormir, noche tras noche, durante varios años.

Tal vez, esta idea obsesiva con que Einstein miraba las consecuencias de que nada pudiese suceder a velocidad mayor que la de la luz, pudo ser resultado de no haber tenido plata para pagar la luz... ni el arriendo, ni el agua, aunque es posible que en aquella época, quien haya estado a cargo de semejantes labores, haya sido Mileva, su esposa; que además de ser intelectualmente brillante, era capaz de planchar, cocinar, cuidar de los niños y corregir los trabajos de Física que su esposo escribía, o sea, de hacer varias cosas al mismo tiempo (como la mayoría de las mujeres).

Einstein había postulado, que la velocidad de la luz era la máxima velocidad permitida. De acuerdo a esto, si ocurriese un percance en el Sol (por ejemplo, que el sol desapareciese porque un mago se lo robó, ponte tú), en la Tierra nos enteraríamos de tamaño infortunio, ocho minutos después, porque ningún mensaje (ni siquiera la fuerza de gravedad asociada a la relación de nuestro planeta con el Sol) puede viajar más rápido que la luz. Sin embargo, la ley de gravitación universal de Newton, predice un resultado engañoso; esto es, que en cuanto el Sol desapareciese, inmediatamente se dejaría de percibir su fuerza gravitacional. Sugiero la siguiente imagen mental-holográfica: nosotros tan contentos; entre tanto Einstein, inquieto, molesto, con el reloj en la mano porque entiende que entre la causa (la desaparición del Sol) y el efecto (dejar de percibir la interacción gravitatoria), deben pasar los ocho minutos que el mensaje tarda en hacer el recorrido; no puede ser instantáneo.

Su problema, era definir la forma adecuada de incorporar la fuerza de gravedad en sus ecuaciones, y no lograba dar en el clavo y quedar satisfecho.

Einstein confesó, que mientras trabajaba en la oficina de patentes de Berna, un día se le ocurrió pensar, que si una persona (a la que llamó "cuerpo") venía cayendo desde una gran altura, dentro de una caja (como en un ascensor), esa persona no tenía cómo darse cuenta que venía cayendo, no tenía cómo saber, que era la fuerza de gravedad de la Tierra la que le atraía. De hecho, lo único que esa persona podría percibir, era que flotaba (a esto, yo le agregaría, que el "cuerpo" no se habría dado cuenta que venía cayendo, hasta darse el soberano costalazo contra el suelo). En este punto, ¿considera el lector que el personaje citado (a Einstein me refiero) no fue un poquito indolente? Por favor, desarrolle su espíritu crítico, estamos hablando de un ser humano en caída libre, sin paracaídas. A mí me dolería, incluso, a una araña pollito.

La descripción de la persona cayendo y de su experiencia de no sentir su propio peso (y sentirse “como si flotara”), es precisamente lo que sucede en vehículos donde los astronautas experimentan condiciones que simulan ingravidez. La nave en que hacen las pruebas (como se ha visto en documentales) orbita la Tierra, de manera que, en lo que dura la experiencia, está siempre cayendo con todo su contenido sobre la Tierra, y lo que percibe la tripulación es que flotan, y se desplazan como si nadaran por el interior; esto, Einstein no lo vio en ningún documental, él era el rey de los experimentos “pensados”. La conclusión de la experiencia virtual del cuerpo cayendo, fue bellísima: en caída libre, la gravedad no puede percibirse; si la persona (que aún permanece dentro de la caja) saca unas monedas de su bolsillo y las suelta en el aire, las monedas permanecerán flotando a su lado, no las verá caer. En otras palabras, Einstein se dio cuenta, que no podía distinguirse entre lo que se llama “movimiento con aceleración uniforme” y un “campo gravitatorio uniforme”. Einstein declaró: «Aquella, fue la idea más feliz de mi vida», lo que es muy razonable, porque fue a él a quien se le ocurrió (de hecho, yo también fui muy feliz, cuando logré entenderlo).

A partir de aquella idea feliz, Einstein llegó a plantear el “principio de equivalencia”.

Durante cientos de años, se había supuesto que un objeto masivo, caía más rápido que uno menos masivo, y nadie antes de Galileo atinó a comprobarlo. De hecho, aún hoy, nos sorprende, que si se deja caer dos objetos desde la misma altura (en ausencia de atmósfera); una pluma, tarde lo mismo en caer, que un martillo. Galileo mostró (experimentalmente), que independiente de la masa y composición; dos cuerpos caen con la misma aceleración. Esto se llamó “principio de equivalencia de Galileo” (corroborado después, mediante las leyes de Newton), y establecía, que la masa inercial (relacionada con la fuerza necesaria para sacar al cuerpo de la inercia

y acelerarlo) y la masa gravitatoria (que determina la magnitud de la fuerza gravitatoria sobre el cuerpo), son iguales. Esta equivalencia, llevó a Einstein a formular su principio de equivalencia de la Relatividad General.

Principio de equivalencia de la Relatividad General

Con el Postulado Uno de la Relatividad Especial, Einstein ya había formulado un principio de equivalencia; esto es, que en un laboratorio no se puede distinguir si se está en reposo o en movimiento uniforme, a partir de los experimentos realizados en su interior (de modo que la velocidad a la que se viaja, si es cercana a la de la luz; tiene efectos sobre el tiempo y el espacio). Ahora, desde la Relatividad General, nos dice que no puede distinguirse entre aceleración uniforme y un campo gravitatorio uniforme. Si se realizan experimentos en un laboratorio sobre la superficie de la Tierra y en otro laboratorio acelerado con g (la aceleración de gravedad en la Tierra) hacia arriba; los resultados serán los mismos. Este principio tiene una limitación; el "laboratorio" donde se realicen los experimentos, debe ser pequeño, y la duración del experimento, debe ser breve. Si pusiésemos a un observador voluntario en un laboratorio pequeño en caída libre (lo que se percibe como gravedad nula o ingravidez); el voluntario en su interior, sentiría que flota y no que está cayendo (ver Nota). Los objetos e instrumentos del laboratorio, que no estuviesen anclados a las paredes, también flotarían, y si el laboratorio fuese muy grande, el voluntario observaría, que a medida que descienden, los objetos se van acercando a él y entre sí. Esto último puede parecer más raro aún, pero no debe olvidarse, que la caída se produce hacia el centro de la Tierra. Al comienzo, los objetos caerían aparentemente en forma paralela, pero (dado que se cae perpendicular a la Tierra y que la Tierra es curva) los objetos apuntarían hacia el centro, y el

observador se daría cuenta, que no está flotando, sino que está en caída libre.

Nota de profundización:

La condición de ingravidez (o de no percibir que se está cayendo, aunque realmente sea así, debido a la fuerza gravitatoria) puede simularse, y es más sencilla de asimilar si tomamos en cuenta que hay diferentes formas de “caer”. Se llama “caída libre” al movimiento de un objeto que sólo está determinado por la fuerza de gravedad (para fines prácticos no consideremos el roce con el aire). Podemos dejar caer un objeto al soltarlo desde cierta altura y su trayectoria será vertical hacia la Tierra, pero también podemos darle un impulso inicial, hacer que su trayectoria sea una parábola y también estará en caída libre. Newton ya se había dado cuenta de esto, e imaginó una situación en que una bala de cañón era lanzada desde una montaña, con tal velocidad inicial y en tal ángulo, que esa bala daba la vuelta completa a la Tierra porque siempre estaba cayendo sobre ella. Lo mismo hacen las naves espaciales, en cuyo interior vemos cayendo, perdón, flotando felices como niños, a sus tripulantes. Estas naves orbitan el planeta, vale decir, constantemente están en caída libre sobre la Tierra, pero lo que ellos experimentan, es que flotan, sienten que no tienen peso. De hecho, existen vuelos comerciales donde, con el avión ya en altura, se realizan tramos muy cortos de vuelo en parábola y durante unos cuantos segundos, los pasajeros experimentan la sensación de ingravidez, que de seguro es preciosa, efímera y carísima.

El trabajo matemático que Einstein desarrolló posteriormente (no sin ayuda), le llevó a un conjunto de ecuaciones inútiles de explicar, a quienes no somos entendidos. Orientado por Marcel Grossman (el mismo

matemático buen amigo, que le había conseguido unos años antes, el trabajo en la oficina de patentes), pudo Einstein encontrar, quien le enseñase una matemática que se llama "cálculo tensorial". Esto le permitió llegar a deducir su ecuación de campo; en apariencia, se trataba de una sola ecuación, pero realmente correspondía a un conjunto de ecuaciones complicadas de resolver. Sin embargo, impregnados de la altura de miras que nos mueve (a mí, el escribir esto; y a usted, el estar leyendo), en lugar de escribir la ecuación, pondremos en palabras lo que ella representa.

Geometría del espacio-tiempo = Distribución de materia y energía

La ecuación puede expresarse con palabras, y aun así, no logra uno saber de qué se trata ¿verdad? Afortunadamente, John Wheeler (prestigioso físico norteamericano) que popularizó también el concepto de "agujero negro", nos proporciona una lectura comprensible de la ecuación, cuando la resume en la siguiente frase:

"El espacio-tiempo dice a la materia cómo moverse, y la materia dice al espacio-tiempo cómo curvarse".

La Física puede resultar muy perturbadora, porque hay que admitirlo... la ecuación, expresada en palabras apropiadas, resulta sumamente sensual.

La materia y/o energía, determinan la forma del espacio-tiempo a su alrededor, y una vez que el espacio-tiempo adquiere cierta geometría; la materia que transite por allí, tendrá que obedecerle a la geometría del espacio-tiempo.

La presencia de un objeto grande como el Sol (su materia), distorsiona o deforma el espacio-tiempo a su alrededor; lo curva. La gravedad, ya no se entiende como una fuerza de atracción; lo que la ecuación proporciona,

es una descripción geométrica de la gravedad. En un espacio plano, la distancia más corta entre dos puntos es una recta, sin embargo, si dos personas separadas entre sí por 800 km, deciden caminar “derechito” (una hacia la otra, hasta encontrarse), resulta que la distancia más corta entre los puntos que las separa, sigue siendo una línea recta; pero sobre la superficie de la Tierra, que es curva. La distancia más corta entre dos puntos sobre una superficie, se denomina “geodésica”. En esta cosmovisión, los planetas no giran en torno al Sol como respuesta a una mutua fuerza gravitacional; sino que lo hacen porque no tienen alternativa, ellos siguen una trayectoria recta por la geodésica. Ese es el camino que el Sol les propone, después de haber deformado con su sola presencia (con su masa, con su energía), el espacio-tiempo a su alrededor.

La gran masa del Sol, deforma su entorno y define las rutas que los planetas deben seguir a su alrededor, y la cosa no termina allí, pues esto, no sólo es válido para cuerpos que contienen masa. Hasta un rayo de luz proveniente de otra estrella (que pase cerca del Sol), no tendrá más remedio que seguir la trayectoria que el astro rey ha trazado, y en lugar de viajar en línea recta, el obediente rayo de luz se curvará en torno al Sol. Se curva sólo porque el Sol está allí. En la visión de Newton, los cuerpos se atraían gravitacionalmente en virtud de su masa; la luz no tiene masa, pero se somete a las deformaciones que la masa del Sol le ha hecho al espacio-tiempo que le rodea. Si el fotón (sin masa), que viene viajando en línea recta, sigue una trayectoria curva, es porque el espacio está curvado; sin embargo, teniendo en cuenta la Relatividad Especial (es decir, la equivalencia entre masa y energía ($E=mc^2$), queda claro que, es la presencia de masa y/o energía la que causa la curvatura, y que la gravedad no sólo afectará a lo que posee masa, sino también a lo que transporta energía (como los fotones).

“El espacio-tiempo dice a la materia cómo moverse, y la materia dice al espacio-tiempo cómo curvarse”.

La paradoja de los gemelos fue un desafío para Einstein, y le encontró solución en el marco de la Relatividad General. Es el gemelo que va de viaje (el que está acelerado) quien envejece más lento. En la Relatividad Especial, al tratarse de sistemas de referencia inerciales, es imposible resolver el problema, porque ambos protagonistas pueden declarar que vieron al otro pasar sopladados, a velocidad casi lumínica por el lado de ellos, y ambos tendrán la razón (como cuando estando detenidos, nos parece que nuestro vehículo se ha puesto en movimiento, y resulta que, es el auto que va al lado el que se desplazó). En la Relatividad General, sí se puede distinguir quién está en movimiento, debido a que uno permanece en casa y el otro es acelerado (no inercial).

Debido al principio de equivalencia, un campo gravitatorio no sólo tiene el efecto de curvar el espacio-tiempo, sino también de dilatar el tiempo, es decir, de hacer que transcurra más lento. Ya se vio en la paradoja de los gemelos, que la aceleración tiene el efecto de dilatar el tiempo; y ya se dijo, que la gravedad es equivalente a la aceleración. Sucede que la gravedad es mayor a nivel del mar que a gran altura. Entonces, si dos hermanas mellizas son separadas por muchos años; y una vive en el borde costero; en tanto la otra, habita en la torre más alta del castillo más alto de la montaña más alta, al comparar los relojes de ambas (después de algunos años), se comprobará que el reloj de la melliza que vive más cerca del centro de la Tierra, ha avanzado más lento; por tanto, será unas millonésimas de segundo más joven que su hermana... algo es algo.

Comprobación de la teoría de la Relatividad General

Quizá el enterarnos que la luz curva su trayectoria al pasar frente al astro rey, nos haya recordado el sueño de José (antes de ser exiliado a Egipto por los bromistas de sus hermanos). Lo cierto, es que la Teoría de la Relatividad General, planteada en 1915, recibió contundente confirmación experimental en 1919. Fue Sir Arthur Eddington (el primero entre sus pares, y conocido bien pronto, como el padre de la Astronomía) quien entendió, divulgó y comprobó, las teorías de Einstein. De haber sido uno de nosotros, parte de aquel espacio-tiempo circunstancia, esto es, de haber mostrado habilidades científicas acordes con la Astronomía, hubiese sido cosa muy recomendable, granjearnos el cariño de Sir Eddington.

En los años previos a 1919 (y con la Primera Guerra Mundial en curso), muchos hombres ingleses estaban siendo enviados a las trincheras, sin embargo, el gobierno británico informó a Sir Arthur Eddington, que él quedaba eximido de esa responsabilidad, debido a sus contribuciones a las Ciencias (pasadas y por pasar). En ese momento Sir Eddington, se la jugó por sus valores, pero se la jugó mal y le expresó al gobierno, que de ningún modo iría al frente, porque se declaraba objetor de conciencia. Ciertamente fue una mala jugada, porque le llovieron amenazas; Eddington provenía de una familia cuáquera (de un credo religioso que surgió en Inglaterra y se extendió después a Estados Unidos; la imagen del cuáquero típico aparece en el logo de una conocida marca de cereal), y sus amigos que practicaban ese credo, por negarse a ir a la guerra, habían sido enviados a trabajo forzado.

Suele decirse, que tener amigos es mejor que tener plata, y Eddington tenía amigos que le ayudaron a salir de aquel impasse. Sir Eddington quedó a salvo de la guerra y de las ingratas actividades de granjero cuáquero, porque

a cambio le encomendaron un castigo brutal, y de seguro, le costó bastante disimular que la idea lo volvía loco de contento. Fue enviado en 1919, al este de las costas de África ecuatorial a observar un eclipse total, que se produjo en mayo de ese año; allí, debía tomar fotografías del cielo anochecido por el eclipse y realizar mediciones.

Esencialmente, corroboró que en las fotografías aparecía una estrella que (dado el ángulo y la hora del día) sería imposible de fotografiar allí donde se la veía, porque en rigor debía estar oculta por el Sol (detrás de éste). A menos, que la luz proveniente de esa estrella rodease al Sol por un costado, tomando en torno al astro una trayectoria curva y ¡Eureka!... Esto sólo podía haber sucedido, si el Sol distorsionase el espacio-tiempo a su alrededor, obligando a la luz a viajar en rotonda, como aparece en la Figura N° 13.

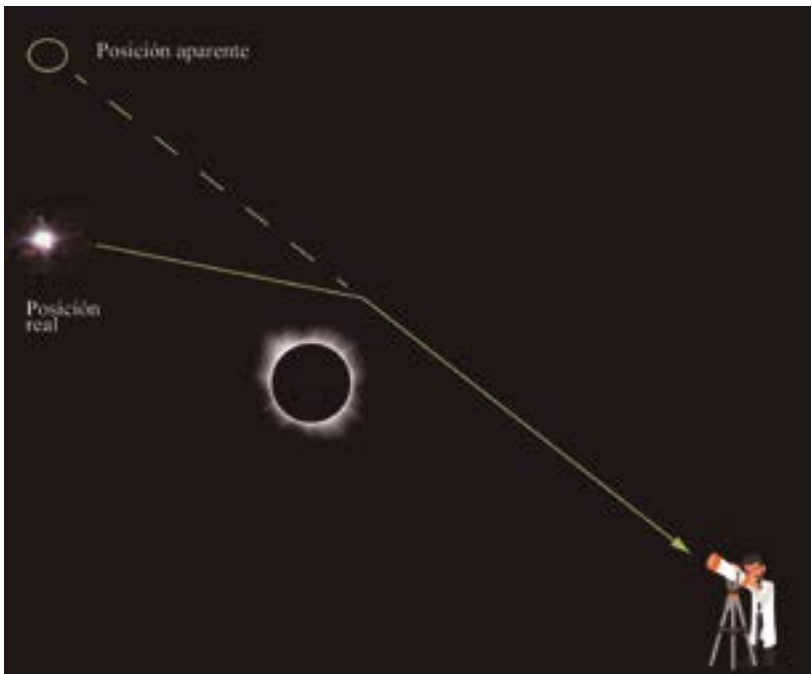


Figura N° 13: La luz se curva

El anterior, no es el único cálculo que se utiliza como comprobación de la Relatividad General. Esta consideración relativista se utiliza, por ejemplo, para calcular adecuadamente la órbita de Mercurio, y entrega un resultado mucho más exacto que el de las predicciones newtonianas, y hoy en día, cuando usted va en auto a visitar a su mamá (algo tan bien visto, que nunca pasará de moda) y dobla en la esquina anterior a la calle en que vive su progenitora, para pasar al almacén a comprarle un “engañito”; la española (aquella que parece haber recorrido todas las calles del mundo), con su cálido acento cargado al seseo, le dirá: «Recalculando», ¡porque allí está la relatividad! Son las consideraciones relativistas las que permiten al GPS, mostrar la posición de nuestro auto en pantalla, ¡justo cuando vamos doblando la esquina!; de lo contrario, apareceríamos considerablemente desplazados de nuestra verdadera ubicación.

Para que no se crea que en la Ciencia todo es miel sobre hojuelas, se hace menester hacer un alcance. Con los años, se comprobó que Sir Eddington se había equivocado en sus cálculos. Mmm... También allí hubo que recalculer, para mostrar (que de todos modos) la Relatividad General funcionaba, y que efectivamente, el espacio-tiempo (por causa de objetos muy masivos, como el Sol) se distorsionaba. Es decir, Sir Arthur Eddington le achuntó de entusiasta, ¡y por chiripa! En este caso, vale la pena decir: «Salud por ello».

Volvamos con nuestro amigo Einstein, con quien a estas alturas ya hemos establecido lazos, ¿no le parece? Pues bien, en la década de 1920, a Einstein la vida se le volvió una fiesta. Es bien conocido, que la mucha bonanza lleva a las personas a cometer excesos, y en aquello, Einstein no fue la excepción, sino la norma. Sus ecuaciones de campo predecían un Universo dinámico, pero eso a Einstein no le complacía para nada, y galopando sobre su ego (como sólo los genios pueden hacerlo), enunció públicamente cómo debía ser el Universo (que sus ecuaciones

describían), para sentirse él a sus anchas; el Universo debía ser estático. Asumido esto, se dejó seducir por la idea de agregar un parámetro de carácter anti-gravitatorio, de modo que el Universo descrito por las ecuaciones, se mantuviese estático. El término, introducido “a mano”, conocido como “constante cosmológica” (Λ), tenía a su cargo la tarea de mantener una repulsión suficiente para contrarrestar la gravedad; cuya tendencia a atraerlo todo, no le permitía al Universo ser estático.

Todo esto, sucedía por la misma época en que, primero Friedmann, y luego Lemaître, se hubieron acercado a Einstein a tratar de convencerlo de que el Universo era dinámico, y que el origen, podría haber comenzado con un átomo primigenio.

El concepto de átomo primitivo (o primigenio) venía impregnado, a ojos de la comunidad científica de la época, del aroma penetrante y pernicioso de la creación divina. Ese sólo hecho, le otorgaba un carácter poco serio, un sacerdote tratando de convencer a Einstein y a la comunidad científica, que el átomo primitivo... ¿se creó solo? De seguro, cuando Lemaître atravesaba la sala, lo perseguía un murmullo.

No obstante, otros tantos científicos (físicos y matemáticos), personas brillantes, estaban tan estimuladas por todo lo que ocurría relacionado con la Relatividad General, y tan impregnadas de su propio trabajo, que eran capaces de enfrentar cualquier adversidad, si el objetivo era mostrar los aportes que podían hacer al tema. Tal es el caso de Willem de Sitter (matemático, físico y astrónomo holandés), que ya en 1918 tuvo la audacia de trabajar las ecuaciones de campo, pero considerando un Universo vacío, y lo que concluyó fue, que en el principio bien pudo suceder, la expansión de tal Universo vacío.

Si Friedmann fue ignorado, y en su momento consideraron la incursión de Lemaître como clara muestra de su palpitante religiosidad, no es sabido de dónde obtuvo Willem de Sitter, la entereza para enfrentar la

atónita mirada de la comunidad científica y la del propio Einstein; frente a sus ojos le estaban distorsionando una teoría que era el resultado de años de trabajo. De seguro fue en esa época que Einstein tomó el hábito de chasconearse los pelos, que no era para menos.

El propio Einstein había necesitado plantearse la Relatividad General, precisamente, porque en el Universo había objetos masivos (estrellas, planetas) que exigían incluir los efectos de la gravedad, y Willem de Sitter lo amenazaba con... ¿la expansión de un Universo vacío? (¿Dónde iremos a parar?).

HUBBLE CAMBIA LA VISIÓN DEL UNIVERSO

“En su mano izquierda sostenida una pipa. En los ojos, la inconfundible mirada del tigre”.



Figura N° 14: Croquis de Edwin Hubble

Hacia fines de los años 20, desde el observatorio Monte Wilson, el astrónomo Edwin Hubble (cuya imagen dista bastante del clásico científico loco, pero sí nos recuerda demasiado a Humphrey Bogart de "Casablanca"), había realizado un gran número de mediciones, que le permitieron afirmar unas cuantas cosas sorprendentes. Aquella, era todavía una época en que el concepto de galaxia era sinónimo de Universo, sin embargo en 1924, Hubble demostró, que además de la nuestra, había también muchas otras galaxias; observó que ciertas nebulosas reportadas por observaciones previas, en realidad, eran galaxias ajenas a la nuestra; y en un trabajo realizado en colaboración con Milton Humason (quien es descrito en una entrada de internet, como "el mulero que aprendió a amar las galaxias"), descubrió que la mayoría de las galaxias se alejaban, o en otras palabras, se alejan de la nuestra, y en general, se alejan unas de otras. Después de anunciado este descubrimiento, hablar de Universo en expansión, se volvió tema cotidiano.

Los resultados se vieron reflejados en la ley de Hubble, que permite determinar la tasa de expansión del Universo, valor conocido como "parámetro de Hubble"; que no es una constante, ya que varía a medida que el Universo se expande.

El Parámetro de Hubble actual se estima en $(70\text{km/s})/\text{Mpc}$ y tiene una enorme importancia. El inverso del parámetro de Hubble, multiplicado por un factor geométrico, permite determinar con alta precisión la edad del Universo. Sin embargo, se puede obtener una estimación aceptable de la edad del Universo haciendo un cálculo sencillo que no considera la multiplicación por el factor geométrico, y que le ayuda a uno a comprender la relevancia del parámetro de Hubble.

Si damos un vistazo a las unidades, veremos que Mpc significa "un millón de parsec"; un parsec es una unidad de distancia muy utilizada en Astronomía. Haciendo las conversiones adecuadas, 1Mpc puede llegar a expresarse en Km (que al ir en el denominador, se cancelan con

los Km del numerador), y las unidades del parámetro de Hubble se reducen ($1/s$). Al tomar el inverso de este valor, obtendremos un tiempo en segundos, que será ridículamente enorme; habrá que llevarlo a horas, luego a años, y una vez hecho eso, el resultado será razonablemente cercano a 13.800 millones de años. Dando de nuevo un vistazo al croquis de Hubble, me parece que refleja la actitud de alguien cuya vanidad va más allá de lo físico, veo en su expresión que está claramente consciente de haber aportado lo suyo a la humanidad y empieza a entender uno/a, el porqué de la mirada del tigre, ¿verdad?

Nota de profundización:

1 parsec equivale a 3,26 años luz de distancia. El parsec se usa en Astronomía, y corresponde a la distancia a la que se encuentra un objeto, cuando presenta un segundo de arco de paralaje. Para entender qué es la paralaje, siga las siguientes instrucciones: estire el brazo derecho con el pulgar hacia arriba, cubra su ojo izquierdo, y defina la región, que mirando sólo con el ojo derecho queda oculta por su dedo. Sin mover su brazo, repita, cubriendo el ojo derecho y observando con el izquierdo. ¿Se da cuenta que, respecto al fondo, parece que su dedo se mueve al pasar la visión, de un ojo al otro? De esa diferencia (entre la posición aparente de su dedo pulgar) aparece la paralaje, que gracias a relaciones de ángulos y trigonometría, permite calcular la distancia a la que se encuentran los objetos (cuyo paralaje se observa). En el caso de las estrellas, están tan lejanas, que es imposible registrar diferencias en su posición aparente, cubriéndose un ojo; necesitamos observar desde dos puntos, muy separados entre sí. Una línea base adecuada para realizar la observación, se tiene midiendo la posición de la estrella estudiada en enero, y luego 6 meses después, cuando la Tierra está en el otro extremo de su órbita.

Dado que las observaciones permitían establecer que el Universo estaba en expansión, Einstein reparó que la constante cosmológica resultaba innecesaria, porque su función (anti-gravitatoria) ya no era requerida. El Universo (se pensaba en ese entonces) no se está expandiendo debido a una constante cosmológica, sino que se está expandiendo, porque todo comenzó con un estallido, y el impulso de esa explosión todavía se percibe, y sigue permitiendo que las galaxias se separen.

Con el paso de los años, las nuevas ideas tuvieron maravillados admiradores y fervorosos detractores, entre estos últimos se encontraba Fred Hoyle; quien contribuyó al desarrollo de mecanismos que permiten explicar la “nucleosíntesis estelar”. Hoyle, nunca dejó de creer en un Universo que, si no era estático, al menos era estacionario, como un río que fluye, pero que siempre es el mismo; siendo así, se refirió a la nueva teoría como **“Big Bang”**, como comentaremos más adelante, su verdadera intención era ser peyorativo. Jamás imaginó que ese apelativo, le otorgaría a la naciente teoría, un halo de encanto para la comunidad científica; y la aceptación y fama, por parte del público.

A fin de cuentas, el Universo no es un lugar estático, y la distribución de galaxias (a escala suficientemente grande) puede considerarse homogénea. Esta visión del Universo isótropo y homogéneo, constituye el llamado “principio cosmológico” (Isótropo: que el Universo, a grandes escalas, es igual en todas direcciones. Homogéneo: que el Universo, a grandes escalas, presenta las mismas grandes estructuras en todas partes).

LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO Y EL DESPLAZAMIENTO AL ROJO

Es válido en este punto preguntarse; ¿cómo pudieron darse cuenta los astrónomos, que otras galaxias se acercaban (o se alejaban) de nuestra galaxia que es la Vía Láctea? La ley de Hubble requirió conocer las distancias de unas cuantas galaxias y obtener información de los espectros luminosos de las mismas, para determinar que se estaban alejando. En el capítulo II se explicó el efecto Doppler, por lo tanto, no haré reiteraciones acá. El hecho es, que para la mayoría de las galaxias lo que se observa, es que el espectro de luz proveniente de ellas, aparece desplazado hacia el rojo, y esa evidencia, permite concluir que se nos están alejando.

En la antigua Grecia, Eratóstenes, había determinado el diámetro de la Tierra basado en las proyecciones de sombras medidas a la misma hora, pero en distintas latitudes de la península; más tarde, utilizaron geometría, trigonometría y la paralaje, para calcular la distancia entre la Tierra y la Luna. El mismo método, fue usado por los astrónomos para determinar distancias de estrellas cercanas. Poco antes del descubrimiento de Hubble, surgió un método de determinación de distancias a estrellas lejanas, denominado “de las Cefeidas variables”.

Conocido el descubrimiento de Hubble, y replanteándose cuán equivocado estaba, Albert Einstein habría dicho algo así como; «Esta es la peor pifia de mi carrera». Sin embargo, como veremos más adelante, con el tiempo, la interpretación de las causas del corrimiento hacia el rojo, se han visto severamente modificadas, tanto, que hay quienes piensan que quizá la mayor equivocación de Einstein, fue haber creído que aquella vez estaba equivocado, y que fue apresurado, deshacerse de la constante cosmológica.

El curso que tomaría más tarde la Teoría del Big Bang, estuvo a cargo de un astrónomo ruso, George Gamow,

que cuando cumplió trece tiernos años; su padre le regaló un telescopio. Gamow reformuló las ideas sobre el antiguo átomo primitivo y lo llamó el "Hylem", o "huevo cósmico". Este Hylem, era un sistema a alta temperatura.

En algún punto de su carrera conjunta, Ralph Alpher (el estudiante de doctorado, que trabajaba con Gamow) y Robert Herman, plantearon que debía haber alguna evidencia experimental, alguna radiación desprendida desde el Universo temprano, que de seguro daba cuenta que Hylem, era una hipótesis razonable. Estas ideas fueron ampliamente divulgadas por Gamow, sin embargo, a Alpher y Herman les faltó financiamiento para materializar la búsqueda de esa evidencia, y con el paso de los años, la idea misma de la supuesta evidencia, pasó al olvido. Más tarde, nacionalizado americano, Gamow trabajó con Bethe, y planteó los procesos de evolución estelar, que desencadenarían en la génesis de los elementos químicos. Gamow era conocido por su buen humor, y en la publicación del trabajo realizado con Alpher (en el que Bethe no había participado), incluyó a Bethe; sólo para que después del título, el artículo dijese "Alpher, Bethe, Gamow", que sonaba como "alfa, beta, gama". Muy apropiado para hablar del origen del Universo... (Humor de científicos, por cierto).

CRÓNICA DE UNA EVIDENCIA ESPERADA: LA RADIACIÓN DE FONDO

En 1965, la casualidad estaba buscándose con la Ciencia; por aquellos días, lo que brillaba era la Física de Partículas, y a muchos físicos (colmados de ese brillo), hablar de la relatividad y del Big Bang, les olía rancio. Tal vez por eso, las Ciencias que estudian el Universo, necesitaban (ansiaban) volver a su rol de divas, y quizá por eso, dejaron caer una buena estrella sobre New Jersey.

Dos radioastrónomos, de apellidos Penzias y Wilson, estaban tratando de calibrar una antena con forma de cuerno, en los laboratorios Bell en New Jersey. La antena se emplearía para detectar determinadas ondas de radio. Sin embargo, se encontraron con que la señal presentaba un ruido de fondo. Para eliminar ese ruido, se dieron a diversas tareas; alejar palomas que anidaban en la antena, limpiar la antena de blanquecinos desechos de paloma, eliminar palomas resilientes, en fin... pero el ruido continuaba.

Sólo a unos 60 km de allí, en la Universidad de Princeton, un grupo de científicos estaba buscando financiamiento para verificar la existencia de un ruido por el estilo.

Es de suponer, que cuando se trabaja en cierta área de la Ciencia, se debe estar actualizado de los últimos avances, y a la vez, se debe manejar con cierta soltura, la información previa que se conoce del tema. Esto que parece de Perogrullo, no siempre sucede. Efectivamente, en Princeton, un grupo de trabajo liderado por Robert Dicke y Jim Peebles (aparentemente sin conocimiento de las propuestas hechas, veinte años antes, por Alpher y Herman), planteaban la hipótesis de la existencia de alguna radiación, que debía provenir desde el Universo profundo; una "radiación de fondo".

Ambos grupos de trabajo (con objetivos tan disímiles) tomaron contacto, y habiéndose aclarado el origen de la supuesta falla que estaban teniendo, Penzias y Wilson quedaron bastante tranquilos, y de seguro, contentos; después de todo, habían descubierto la "radiación de fondo de microondas". Cabe imaginar que, muy por el contrario, Dicke y Peebles (probablemente) quedaron desencantados. Ellos entendían demasiado bien, que aquel ruido de fondo (en la región de la radiación electromagnética de microondas) correspondía, precisamente, lo que debían buscar. Su búsqueda, había terminado antes de comenzar.

Como el Premio Nobel no es un estímulo a las ideas, sino a los descubrimientos; en 1979, Penzias y Wilson recibieron el galardón por el descubrimiento de la “radiación de fondo de microondas”. Para hacerse una idea de cómo se percibe dicha radiación, basta con encender un viejo televisor de tubo cuando no hay señal; un porcentaje de ese chicharreo (que los mayorcitos conocemos de sobra) es la señal de radiación de fondo de microondas, y su cualidad más interesante, es que proviene de todas las regiones del espacio.

LA MECÁNICA CUÁNTICA PIDE LA PALABRA

La Teoría de la Relatividad General proporciona una cosmovisión, una manera de explicar el Universo a gran escala. En el otro extremo está la Mecánica Cuántica, entregando una concepción de lo que sucede a nivel atómico y subatómico.

Cuando se trata del Universo a gran escala, la diva del espectáculo es la gravedad, asociada a las grandes masas de los cuerpos celestes; ella es la fuerza más débil de todas, pero pone al cosmos a sus pies, y ante su presencia, hace deformarse al espacio-tiempo. Sin embargo, para hablar del Universo “cuando era chico”, es la Mecánica Cuántica quien tiene la palabra.

Como veremos en el capítulo siguiente, en su lucha por compactarlo todo, la fuerza gravitacional genera condiciones extremas, y con ello, temperaturas tan altas, que consigue que se enciendan las estrellas. Pero (de nuevo), cuando las estrellas se encienden (una vez que se ha elevado la temperatura), lo hacen, debido a las poderosas reacciones que ocurren en los núcleos de los átomos.

Estas teorías tan disímiles, son dos maneras diferentes de explicarnos la naturaleza para órdenes de magnitud colosalmente distintos, y ambas tienen enorme poder

predictivo dentro de su dominio. No obstante, así como para la teoría relativista no existe un “antes del Big Bang”; tampoco lo hay para la Mecánica Cuántica. Para esta última, el Big Bang pudo haberse originado debido a que al vacío le pasó algo, que los físicos cuánticos llaman “fluctuación cuántica del vacío” (que además habría resultado exitosa). Las fluctuaciones del vacío, a partir de la energía liberada en el Big Bang, han de haber producido materia y antimateria que se aniquilan entre ellas. La teoría considera que hay evidencia para decir que en el Big Bang se generó un exceso de materia que no se aniquiló, y ese punto de partida permitió al Universo llegar hasta donde se encuentra hoy. Lo que es muy exitoso, porque si todo se hubiese aniquilado, no hubiese existido el surgimiento del Universo que conocemos, y el éxito radica en ello. Retomando la idea anterior, las fluctuaciones del vacío pueden ser explicadas al alero del principio de incertidumbre de Heisenberg.

El principio de incertidumbre es uno de los pilares de la Mecánica Cuántica. Según él, si determinamos con precisión la posición de una partícula, perderemos irremediamente información sobre su velocidad, y viceversa. Para ilustrar, que desde el punto de vista de la Mecánica Clásica, podemos conocer en forma precisa ambos parámetros (velocidad y ubicación); pediremos la intervención de nuestros amigos, Europio y Samario.

Veamos: Samario recibe una llamada de Europio, que de regreso de su viaje espacial se ha sentido muy solo, y de nuevo sin dinero, de uno en uno, está reconquistando a sus amigos; «¿Cuándo vas a ir pa' la casa?», pregunta ilusionado Europio. «No puedo», contesta Samario, «Ahora mismo me conseguí un reemplazo. Estoy trabajando acá, en Talca». Entonces, escucha el incómodo silencio de su viejo amigo y añade, «¿Por qué no vienes a verme el fin de semana? Si sales de Santiago a las 12, alcanzarías a llegar al almuerzo... porque almorzamos tarde». Después de la llamada, Europio toma un libro de

Walt Whitman, abre una página previamente marcada, y con los ojos llenos de lágrimas, lee "Vi en Louisiana crecer una Encina"; hermoso poema que trata sobre la importancia de la amistad.

La Mecánica Clásica permite predecir a qué hora llegará Europeo a Talca, si sale de Santiago a las 12 del día, y permite determinar con precisión su velocidad y su posición, a lo largo del trayecto.

En el mundo de lo pequeño, hacer afirmaciones precisas, se ve complicado, porque las cosas son diferentes. De acuerdo al principio de incertidumbre, no es posible conocer con precisión y en forma simultánea, la posición y la velocidad de un electrón. En la medida en que se gana conocimiento de la velocidad; se pierde conocimiento de la posición de la partícula. Como se dijo en el capítulo I, esto no depende del instrumento de medida, sino del carácter cuántico de la naturaleza a nivel atómico. Es más, si se consiguiese confinar al electrón a un espacio mínimo (en una caja chiquita, por ejemplo), conoceríamos en forma precisa su ubicación; pero su movimiento, sus vibraciones aleatorias serían impredecibles; pues nada se consigue con pretender que el electrón se quede quieto, no es posible frenarlo. La energía de un sistema, también tiene una incertidumbre inherente, y está relacionada con el intervalo de tiempo que el sistema permanece en ese estado. Si un sistema permanece en un estado durante un tiempo demasiado corto; la incertidumbre en su energía será lo suficientemente grande, de modo que se cumpla, en términos matemáticos, lo que establece el principio de incertidumbre.

El principio de incertidumbre para la energía y el tiempo, se cumple aún en el espacio vacío, porque en el vacío hay "algo". No es fácil aceptar que en el vacío hay algo, sin embargo, si se acude a la experiencia, se encuentran varias situaciones que muestran que esto no es raro; se puede hacer vacío en una región de la sala y, aun así, observaremos que en ese espacio vacío, los objetos caen

si se los deja caer, porque existe un campo gravitatorio; si un aprendiz de mago, "con su magia" mueve un clip sobre la mesa, de seguro usted pensará que bajo la mesa hay un imán, es decir, que el clip es víctima de un campo magnético; tampoco nos resultaría extraña la presencia de un campo eléctrico o electromagnético; entonces, aun en ausencia de partículas, la existencia de campos en el espacio vacío (después de pensarlo un poco) resulta bastante familiar.

Es posible hacer vacío retirando las partículas de una región del espacio, pero no es posible eliminar completamente los campos que lo permean, y no se puede evitar que a esa región vacía del espacio le suceden cosas: fluctuaciones cuánticas del vacío; oscilaciones electromagnéticas impredecibles (que son imposibles de eliminar, tal como sería imposible eliminar el movimiento de un electrón, aunque lo encerrásemos en una minúscula cajita); entre otros. Las fluctuaciones del vacío se explican diciendo que, constantemente y en forma aleatoria, se generan regiones de energía positiva a expensas de regiones que quedan con energía negativa. En el proceso, hacen surgir partículas virtuales; aunque estas oscilaciones (en promedio) no contengan energía.

De acuerdo al principio de conservación de la energía (en un vacío como el descrito), no hay de dónde sacar energía para pasarle a una partícula virtual, y permitir que exista; sin embargo, el principio de incertidumbre se cumple, aún en el vacío más extremo, y las fluctuaciones inevitables del vacío se explican, admitiendo que se forman partículas virtuales, porque toman energía prestada (dejando regiones al debe), a condición de devolverla, en un tiempo que puede determinarse mediante el principio de incertidumbre, y que resulta tan pequeño, que el principio de conservación de la energía no alcanza a darse cuenta. Un sabio dicho de la gente antigua rezaba: "Quien de lo ajeno se viste, en la calle lo desnuda". Las fluctuaciones cuánticas del vacío se

baten entre el principio de conservación de la energía y el principio de incertidumbre. La partícula virtual existe porque tomó energía prestada, pero le pasa como a Cenicienta; tiene que devolverla en un tiempo brevísimo.

Como vemos, el mundo de lo pequeño tiene sus principios, y desde luego, no es por falta de principios que la existencia de partículas virtuales nos resulte difícil de asimilar. Recién nos estábamos habituando a pensar que en el vacío hay algo, y ahora vemos que las consecuencias del algo, es que existen partículas virtuales...

Con propósitos pedagógicos, le hablaré de una novela que nunca leí; "La nostalgia ya no es como antes", era como se titulaba. Con el tiempo llegué a pensar, que el sólo título de ese libro (que no llegó a mis manos), me había dejado una profunda huella. ¿Y qué relación tiene esto con las partículas virtuales?, se estará preguntando; pues bien, para allá vamos. Durante mucho tiempo estuve tratando de asimilar aquello de las fluctuaciones cuánticas, y un día (revisando unos libros que ni recordaba que tenía) encontré entre sus páginas, una vieja fotografía que no sabía que recordaba. Mientras miraba la fotografía, entendí que lo de la huella del título de la novela no era cierto, que la nostalgia era la misma, era como antes, que era feroz y estaba viva. Lo más parecido a una partícula virtual que concibo imaginar, es esa tremenda nostalgia, que de seguro, había sobrevivido por años en un estado de aparente ausencia, y ahora estaba allí, robándole energía a mi presente, para poder manifestarse. Dicen que las mujeres de antaño (ataviadas con sus zapatitos de tacón y su vestido de domingo), por las mañanas se iban derecho a la estación del ferrocarril, a esperar el regreso de amores perdidos... Ése no habría de ser el caso. No me podía dar el lujo de dejarme avasallar por la nostalgia de un... ¡pastel! Mi "partícula virtual" duró poco. Era ella o yo. ¡Tuve que aniquilarla!

Desde luego, lo anterior es sólo una metáfora, sin embargo, es útil para decir que las fluctuaciones del vacío,

son capaces de generar partícula y antipartícula reales, materia, cosas que existen y luego, en un tiempo tan breve (que es imposible realizar una medición), les sucede lo que se espera para una partícula con su antipartícula al contactarse; se aniquilan. El Big Bang se habría producido a partir de una fluctuación que sí resultó (que no se aniquiló); una fluctuación cuántica del vacío que resultó exitosa.

Hay experimentos que corroboran las fluctuaciones cuánticas electromagnéticas. Una experiencia relevante en ese sentido, la constituye la medición de la carga del electrón. Sucede, que normalmente al electrón se le mide la carga cuando está vestido, pero cuando está desnudo, su carga es ligeramente distinta. Como ya vimos, cuando un electrón está en el vacío; realmente no está solo, está rodeado de fluctuaciones cuánticas. Estas fluctuaciones se manifiestan, "visten" al electrón a tal punto, que la carga que se mide se ve disminuida. Pero si se optimizan las condiciones (midiendo la carga cerca del electrón y a altas energías) para que las fluctuaciones no tengan ocasión de vestirlo; su carga eléctrica es más alta. Se dice, que esa es la carga del electrón desnudo. Otro raro experimento (que corrobora que en el vacío hay algo), se llama "experimento de Casimir": donde, entre dos placas separadas por espacio vacío, aparece una fuerza "de la nada", que hace a las placas atraerse entre sí; la separación es pequeña y la fuerza es pequeña, pero existe.

LA TEORÍA ESTÁNDAR DEL BIG BANG CON ETAPA INFLACIONARIA

Si un colosal observador estuviese contemplando el Universo, vería por doquier, galaxias y agrupaciones de galaxias llamadas cúmulos, es decir, vería que a gran escala, el Universo es muy homogéneo. La Tierra por ejemplo, está en el Sistema Solar, cuyo vecindario es la Vía Láctea, que es prácticamente la única gran estructura que vemos,

cuando miramos el cielo nocturno a ojo desnudo, sin embargo, ella es sólo una galaxia más, de alrededor de 50 galaxias que forman lo que se llama el Grupo Local (de galaxias), que se encuentra en el súper-cúmulo de galaxias de Virgo. Así también, el Universo a gran escala es isótropo, esto es, que se observan las mismas propiedades en todas las direcciones. Más aún, incluso en regiones muy alejadas entre sí, las propiedades son las mismas. A esto se le llama el “problema del horizonte”, porque durante el tiempo que ha existido el Universo, ni siquiera la luz habría alcanzado a ir de un extremo al otro. ¿Cómo es posible entonces, que el universo sea isótropo?; esas lejanas regiones están a la misma temperatura, ¿por qué? Una teoría de la evolución del Universo, debe ser capaz de explicar la homogeneidad del Universo, su isotropía, el problema del horizonte y su planitud.

Podría uno pensar que, después del descubrimiento de Hubble, no quedaba más opción que asimilar que sí hubo un Big Bang, sin embargo, ha habido más de una teoría candidata a explicar la evolución del Universo. Por ejemplo, Fred Hoyle siguió sosteniendo por años una teoría de un Universo estacionario, que habría existido siempre y que, aun así, podía experimentar expansión. El evidente alejamiento de las galaxias, lo explicaba conjeturando que se formarían, lentamente, nuevas galaxias (aparecerían átomos entre galaxias alejadas, hasta que, acumulativamente, pudiesen formar galaxias nuevas). Afirmaba que el Universo, nunca había sido pequeño. Recordemos que a Hoyle, se le debe el nombre “Big Bang” (que tan cautivador nos resulta). Se dice que Hoyle (quien hizo importantes contribuciones a los procesos de nucleosíntesis de nuevos elementos en las estrellas), habría dicho sobre Lemaître; «Ahí va el hombre del Big Bang»; que por lo general no se traduce al español, pero de hacerlo, no suena bonito, sería: “el gran BOOM”, como la onomatopeya que acompaña el arma de fuego de los malvados cuando le disparan al superhéroe en los cómics

(¡boom! ¡bang! ¡puff!... perdón). Se dice también, que en un programa radial, Hoyle habría hostigado a Gamow, uniendo su nombre al del Big Bang, con no poca ironía. «Tanto va el cántaro al agua, que al fin se rompe», hubiese dicho mi abuela, porque este fue el nombre para el origen del Universo, que “prendió” entre el público. Aquí, no daré detalles de la teoría de Hoyle, porque hay evidencias que la refutan: la existencia de la radiación de fondo de microondas (que fue una de las evidencias más esperadas, aunque no tan buscadas, de que sí hubo un Big Bang) y la detección de estructuras, que la teoría no era capaz de predecir (los quásares, que deben su nombre al acrónimo “quasi stellar objects”; al telescopio parecen estrellas, pero su emisión de energía supone una estructura colosalmente mayor).

Stephen Hawking (cuando era bastante joven) enfrentó a Hoyle, en una conferencia que éste dictaba sobre su Universo estacionario. Terminada la conferencia, en el espacio ofrecido al auditorio para hacer preguntas, Hawking expresó a Hoyle, que los cálculos que estaba presentando estaban equivocados. Una escena como esa puede parecer de pésimo gusto, pero en la Ciencia, es normal enrostrarse las equivocaciones en público. Con los años, sería común para los físicos, esperar con ansiedad el sonido de la silla de ruedas de Hawking avanzando por el pasillo; pues era una buena señal que Hawking asistiese, cuando era invitado a una charla de difusión de nuevas ideas (le esperaban con entusiasmo y nerviosismo, creo yo).

El trabajo matemático asociado a las ecuaciones de la Relatividad General de Einstein, realizado por Stephen Hawking y Roger Penrose, les permitió decir, que al comienzo del espacio y del tiempo hubo una singularidad, un punto de densidad infinita, como la que se produce en un agujero negro. Esta singularidad, curvaba sobre sí misma todo el espacio-tiempo existente, sin embargo, las leyes de la Física no pueden aplicarse a un punto donde las

propiedades se hacen infinitas. Llegar hasta la singularidad, con su densidad infinita, equivalía a decir, que nada se podía decir respecto del origen.

La Teoría del Big Bang estándar (deducida sólo apelando a la Relatividad General de Einstein, como hicieron Lemaître y Gamow), arrastraba la inconsistencia del problema del horizonte; no daba cuenta de en qué momento o etapa, podían haberse comunicado entre sí regiones tan alejadas del espacio, al extremo de presentar la misma temperatura (donde ni la luz habría tenido tiempo de llevar mensajes entre ellas).

El año 1979, el astrofísico norteamericano Alan Guth, propuso que en la primera fracción de fracción de segundo del Big Bang, debió existir una etapa de inflación enormemente acelerada. La teoría original fue revisada y mejorada por el físico ruso Andrei Linde, entre otros. A partir de entonces, diversos modelos que incluyen etapa inflacionaria son ampliamente aceptados en el medio científico, porque es la inflación, acelerada y brevísima, la que permite explicar que existan regiones muy alejadas, con las mismas propiedades, es decir, la homogeneidad que existe entre distancias enormes. Intercalar esta etapa inflacionaria casi al inicio de la secuencia de procesos del Big Bang, le da sustento a la teoría para responder al problema del horizonte. Como se verá en la descripción de sucesos, tales regiones habrían estado en contacto cerca del origen; es decir, tendrían un pasado común.

La Planitud

La Teoría de la Relatividad General, al ofrecer una descripción geométrica de la gravedad, introduce el concepto de curvatura en el Universo. No cualquier geometría satisface la teoría. Las posibles geometrías que satisfacen la teoría, son la de un Universo cerrado (como la superficie de una esfera); la de un Universo abierto plano; o bien, abierto, pero con forma de silla de montar.

De acuerdo a las mediciones realizadas por telescopios espaciales que registran regiones del Universo profundo, se considera actualmente, que el Universo que podemos observar, es plano. La Teoría del Big Bang inflacionaria, permite explicar que la tasa de expansión del Universo genera una superficie con curvatura plana, del mismo modo que percibimos plana la curvatura de la Tierra, cuando nos movemos sobre su superficie.

A la fecha, dista mucho de estar todo dicho en lo que a modelos del Big Bang se refiere. Existen otras líneas de trabajo teórico tan sorprendentes, que parecen fantasía, pero no lo son; son predicciones físicas con soporte matemático. Algunas de estas teorías, que eventualmente incluyen etapas inflacionarias, llegan a plantear que nuestro Universo es uno entre muchos, esto es, que existen multiversos. Resulta tentador imaginar, que en otros mundos (paralelos al nuestro), hemos llevado de infinitas maneras diferentes nuestra vida.

En solo tres minutos

No es fácil aceptar que el proceso que dio origen al Universo haya ocurrido tan de prisa, que a los pocos minutos, ya se habían generado las materias primas con que se han gestado, estrellas, galaxias, planetas, plantas, aves, gatos... nosotros. Tres minutos, o quizá cuatro, fue la idea que popularizó Steven Weinberg en su libro "Los tres primeros minutos del Universo". La Cosmología, dice que 3 minutos es mucho tiempo.

Para que la aproximación al origen sea menos traumática, tendremos en cuenta algunas consideraciones:

a) Cerca del origen, en un Universo pequeño y vacío, surgieron partículas. La Física Cuántica, permite explicar que las regiones vacías del espacio no están vacías, sino que hay presentes en ellas campos cuánticos, que pueden fluctuar y que a partir de esas fluctuaciones, se puede originar materia y antimateria.

b) En el Big Bang, tuvieron que haber surgido y desaparecido, cientos de partículas diferentes, sin embargo, nos limitaremos a hablar de la materia ordinaria: protones, neutrones y electrones de los que estamos hechos, y de neutrinos, que pasan todo el tiempo a través nuestro.

c) De las partículas, algunas de ellas son extraordinariamente estables; los átomos de hidrógeno fueron creados en el Big Bang, y son tan viejos como el Universo. Sin embargo, hay muchísimas partículas exóticas, cuyos tiempos de vida son tan cortos como 0,00000001 segundos, es decir, 1×10^{-8} segundos (y hay otras que viven 1×10^{-16} segundos, o menos). Un segundo para aquellas partículas, a las altas energías en que estaban ocurriendo las cosas, era una eternidad.

d) La teoría, supone que muy tempranamente ocurre una etapa inflacionaria, a una velocidad mucho mayor que la de la luz. Se nos ha repetido, al punto de asimilarlo como la ley natural que es, que nada puede ir más rápido que la luz, porque de acuerdo a la Relatividad General, la masa (inercial) de un objeto se haría infinita, si alcanzase la velocidad de la luz; pero lo que se expandió tan rápidamente no fue algo material, fue el espacio, por lo tanto, no se viola ninguna ley.

En el instante cero; no existía el tiempo, no había espacio, y no existe una respuesta a la pregunta de cómo comenzó todo. Hubo un tiempo extremadamente breve (1×10^{-43} segundos), conocido como tiempo de Planck (esto es 0,00000000... uf, me aburrí, son 42 ceros después del punto decimal, antes de poder escribir el número 1), ese tiempo se relaciona con lo que tardaría un fotón en recorrer la longitud de Planck (1×10^{-35} metros), que era (en ese momento), la distancia de un extremo al otro del Universo naciente. La teoría ofrece explicaciones, desde el momento en que terminó el tiempo de Planck. La temperatura en ese instante, debería corresponder a

la más alta que se puede calcular; se ha determinado que debió ser 1×10^{32} Kelvin (100 quintillones de grados).

El modelo considera que, durante el tiempo de Planck, las 4 fuerzas de la naturaleza (gravitatoria, fuerza fuerte, electromagnética y fuerza nuclear débil) estaban unidas. Al finalizar el tiempo de Planck, ya no eran “felices las cuatro”, y la fuerza gravitatoria se separó de las otras fuerzas. Corroborar este supuesto, adentrarse en el tiempo de Planck, requeriría una teoría cuántica de la gravedad, que a la fecha no existe.

Desde el tiempo de Planck hasta 1×10^{-36} segundos, se le llama era GUT (o Teoría de la Gran Unificación); hacia el final de la era GUT, se separó la fuerza fuerte, permaneciendo unidas la fuerza débil y la electromagnética. Cuando terminó la era GUT, comenzó la etapa inflacionaria y se terminó a 1×10^{-32} segundos, o sea, siguió la misma tónica que las etapas anteriores (apenas las cosas alcanzaban a empezar y se terminaban “al tiro”). La etapa inflacionaria supone que, durante este tiempo absurdamente pequeño, el Universo se expandió desmesuradamente; pasó de un diámetro del orden de 1×10^{-35} metros, a un tamaño poco mayor que un pomelo. No piense que lo hubiese podido tomar en su mano, recuerde que estaba muy, muy caliente. Resulta necesario recurrir a una expansión inflacionaria, para explicar cómo, lugares lejanos en el Universo (que aparentemente, nunca han podido estar en contacto) posean, por ejemplo, la misma temperatura; la causa estaría en que (antes de la etapa inflacionaria), hubo una vez en que sí estuvieron en contacto. Durante esta etapa, es cuando se considera que el Universo emergente se habría expandido a una velocidad mayor que la de la luz; luego de ella, se ralentiza, se sigue expandiendo, pero a una tasa mucho menor. La energía liberada en la inflación, se materializó en un caldero bullente de partículas (quarks y antiquarks), generadas por los fotones muy energéticos allí presentes. Los quarks y antiquarks, se aniquilaban al colisionar entre

ellos, para volver a producirse; razonablemente, ésta se llama “era de los quarks”, aunque también surgieron partículas livianas como los electrones. Cuando han transcurrido 1×10^{-12} segundos, se separa la fuerza electromagnética de la fuerza débil.

Cuando ha pasado una millonésima de segundo y la temperatura ha descendido a 1×10^{13} kelvin, se produce el confinamiento de los quarks; esto significa que ellos pierden su libertad y se combinan para formar protones y neutrones (y también sus antipartículas, y otras partículas no consideradas acá). Las partículas formadas por quarks tienen un nombre genérico, se llaman “hadrones”, de modo que ha comenzado la “era de los hadrones”; los pares de partículas y antipartículas que se forman (por ejemplo, protón-antiprotón), en cuanto se encuentran, se aniquilan, y aunque la energía es suficiente para volver a producir pares, la verdad es que el Universo se sigue expandiendo, la temperatura continúa bajando y llega un momento en que, cuando los pares se aniquilan, ya no se crean otros nuevos, porque no hay energía suficiente para hacerlo, de modo que luego de su aniquilación, subsisten sólo los protones que estaban en exceso. La aniquilación sería la causa que hizo desaparecer la antimateria; sin embargo, para responder a la pregunta de “¿Por qué sobrevivió materia?”, la teoría conjetura que había materia en ligero exceso sobre la antimateria, y considera que hay evidencia de ello. Se ha determinado la proporción entre materia y antimateria, que tuvo que haber en un comienzo, para que después de la aniquilación entre partículas y antipartículas, haya sobrado materia. Esta es, por cada 1000 millones de antipartículas, había (1000 millones + 1) partículas.

A una temperatura de 10 mil millones de kelvin, muchísimo antes de que se cumpla el primer segundo, sucedieron dos cosas relevantes: 1) los neutrinos, que hasta ese momento interactuaban con la materia, dejaron de interactuar, se desacoplaron de la materia, 2) finaliza la

era Hadrónica. Como hasta ese momento había energía de sobra (situación que se prestaba para que cada quien hiciese lo que se le antojaba), protones y neutrones se transformaban unos en otros indistintamente, pero cuando la energía empezó a escasear, las cosas cambiaron, porque si bien es cierto que el proceso de transformación de neutrón a protón libera energía, resulta que el proceso contrario, la consume; de modo que cuando la temperatura bajó hasta 10 mil millones de kelvin, los protones ya no tuvieron recursos para seguir convirtiéndose en neutrones. Sin embargo, los neutrones son inestables fuera del núcleo atómico, así que siguieron convirtiéndose en protones. ¿Todos los neutrones se convirtieron a protones? ¡No! Las sorpresas continuaron.

Cuando la temperatura descendió a mil millones de kelvin (ya han pasado 3 a 4 minutos desde el comienzo), protones y neutrones dieron origen a núcleos de deuterio, que al chocar con otro protón, formaron; helio-3 (2 protones y un neutrón) y luego helio-4 (2 protones y dos neutrones). El proceso de producción de núcleos de elementos, durante los primeros minutos se llama "nucleosíntesis primordial" (para diferenciarla de la generación de elementos en las estrellas, que es nucleosíntesis estelar), y los estudios del origen del Cosmos, revelan proporciones de helio e hidrógeno, que están de acuerdo con los modelos teóricos.

En la cuenta final, también se producen trazas de litio, y subsisten ínfimas cantidades de deuterio, pero en esencia, al concluir el Big Bang, la proporción de núcleos fue 75% protones y 25% núcleos de helio. Aún no se habían formado los átomos; los electrones se movían libremente, entorpeciendo el paso de la radiación, de modo que el Universo era opaco. ¿Los electrones? ¿Qué les ha pasado a los coprotagonistas de este escándalo?

Con el fin de la era hadrónica, comenzó la era de las partículas livianas, o era leptónica. En el caldero bullente de partículas que surgían y se aniquilaban, estaban

también los electrones y sus antipartículas, los positrones (antielectrones o electrones de carga positiva). Como los electrones son leptones (que significa liviano), requieren menos energía para su gestión; en ese caso, la producción de pares de materia-antimateria (electrón-positrón), habría sido posible por varios segundos desde el inicio. Cuando cesó la producción de pares, por aniquilación, desaparecieron todos los positrones, y sólo permanecieron los electrones que estaban en exceso.

Los electrones siguieron interactuando con la radiación por miles de años, en tanto, el Universo se seguía enfriando. Cuando pasaron 380.000 años y la temperatura había descendido hasta 3.000 kelvin, los electrones abandonaron "la vida loca" y tomaron ubicación en torno a los núcleos existentes, lo que se denomina "recombinación", formando átomos neutros de hidrógeno, de helio, y trazas de deuterio y litio. Así las cosas, los fotones ya no encontraron electrones "solteros" y alborotados, que les cerrasen el paso. Desde el momento en que la luz fue libre de transitar por el espacio, se dice que ocurrió el desacoplamiento de los fotones, y entonces, el Universo se hizo transparente. La radiación de fondo de microondas está compuesta de aquellos fotones sumamente viejos (de la época en que se desacoplaron). Claro que, como ellos vienen a la velocidad de la luz, de acuerdo a la relatividad de Einstein; ni han envejecido, ni cuenta se han dado del paso del tiempo, es la luz más antigua del Universo que la Ciencia interpreta como fiel testimonio de que hubo un origen.

Como la radiación de fondo surgió cuando el Universo estaba a 3.000 kelvin y recordando que el espectro de luz que emite un cuerpo caliente depende únicamente de su temperatura, (como se indica en el capítulo II, respecto de la radiación del cuerpo negro) resulta que, en un comienzo, la radiación era principalmente de longitud de onda infrarroja, pero dado que nos alejamos del origen que la emitió, esa radiación ha experimentado

un corrimiento hacia el rojo debido al desplazamiento Doppler (analizado al final del capítulo II). Esa emisión, que casi 13.800 millones de años atrás fue infrarroja, se ha desplazado de zona y presenta hoy un espectro de cuerpo negro en la región correspondiente a microondas. Es fundamental, comprender que la Ciencia predijo (mucho antes que fuese detectada), que debía existir radiación con esas características permeando todo el Universo (recuerde a Alpher, Herman, Gamow). Cuando se la representa en un gráfico, la radiación de fondo de microondas, muestra un espectro que corresponde a la radiación de un cuerpo negro a casi 3 kelvin de temperatura, y el Universo entero sería la cavidad de ese cuerpo negro. Esa radiación, no sólo está en el espacio exterior, está entre nosotros, acompañada de toda la radiación electromagnética en que estamos inmersos. Por eso, junto con la expansión del Universo, la radiación de fondo de microondas, es la mayor evidencia de que hubo un Big Bang.

LA MATERIA Y LA ENERGÍA OSCURAS

Actualmente, se sabe que la materia ordinaria de la que estamos hechos, es menos de un 5% de la cantidad de materia total que hay en el Universo, alrededor de un 25% lo constituye la que se ha dado en llamar “materia oscura”, y cerca del 70% es energía oscura. El concepto de “oscuro” (en ambos casos), obedece a que realmente se desconoce de qué se está hablando. Esta necesidad de atribuirle la responsabilidad de los fenómenos a sustancias o fuerzas hasta ahora desconocidas, puede parecer absurda, sin embargo, tras ella, hay un razonamiento sumamente lógico.

La materia oscura

Ningún objeto consigue salir desde la Tierra al espacio exterior, si no alcanza lo que se llama la “velocidad de escape”. A velocidades menores, el objeto lanzado caerá a metros o a kilómetros (o incluso, a miles de kilómetros de distancia); si la velocidad es mayor, podrá quedar orbitando a cierta altura sobre la Tierra; pero sólo si alcanza la velocidad de escape, puede escapar de la gravedad de la Tierra. Lo mismo rige para las galaxias; si una parte de su material desea escapar de la galaxia, debe superar dicha velocidad de escape.

El concepto de materia oscura apareció a finales de los años 30, como el “problema de la masa faltante”. Fritz Zwicky, astrofísico suizo-estadounidense, trabajando en el Caltech, estudió una región del supercúmulo de Coma, que abarca unas 1.000 galaxias, y dedujo que a las grandes velocidades de movimiento del supercúmulo, las estructuras que lo componen habrían alcanzado de sobra la velocidad de escape, porque la masa visible de las galaxias que contenía no era capaz de generar condiciones gravitatorias para impedirlo; tendrían que haberse escapado. La existencia del supercúmulo, tal como se observa, no podía explicarse a partir de la masa de las galaxias visibles que lo componen, o sea, al supercúmulo de Coma le faltaba masa. Años más tarde, en 1976, Vera Rubin (astrofísica norteamericana), trabajando en la observación de galaxias espirales, descubrió que ocurría algo similar. Para comprenderlo, debemos tener en cuenta que una galaxia es una agrupación de miles de millones de estrellas, pero las estrellas no están quietas, giran en torno al centro de la galaxia. Lo que observó Vera Rubin fue que las galaxias espirales estudiadas tenían una velocidad de giro que no correspondía a la cantidad de materia que se podía medir, a partir de la luz que emitían. De nuevo, si las estrellas no habían escapado de esas galaxias, debía ser porque las galaxias contenían una masa mayor (invisible), generadora de la gravedad faltante

para impedirles escapar. Sería esperable, incluso, que aquellas galaxias se hubiesen desintegrado. A partir de entonces, quedó de manifiesto que el fenómeno descrito por Zwicky, estaba replicado también a nivel galáctico, y que en consecuencia, la masa del Universo es muchísimo mayor que el pequeño porcentaje que se lograba registrar.

Los instrumentos miden aquellos objetos que emiten luz, o que eventualmente interactúan con la luz (como densas y gigantescas nubes de polvo interestelar, visibles debido a otras estrellas que las iluminan), y a partir del cálculo de la masa total de esos objetos, no es posible justificar que las galaxias observadas sean estables. De modo que el razonamiento es: la única explicación para que esta galaxia que parece tan "liviana", gire a tan alta velocidad y no se desintegre (como si su atracción gravitatoria fuese mucho mayor, como si tuviese mayor masa), es que nos está ocultando algo; debe tener materia oculta, materia que está allí, pero que no podemos ver, pues como no interactúa con la luz, no es posible detectarla; pero que las galaxias sean estables y subsistan sin desintegrarse, debe obedecer a que la materia oscura está presente en ellas para retener las estrellas en su interior.

¿En qué consistiría esa materia oscura? La primera respuesta que surge es que correspondería a la suma de cuerpos pequeños que no emiten luz; polvo, meteoritos, planetas enanos, objetos celestes apagados. Pero, se calcula que, si la proporción de ese tipo de material es la misma que se puede determinar en regiones cercanas de nuestra galaxia, entonces los números no cuadran; debe tratarse de algo distinto, de un nuevo tipo (o tipos) de materia, que aún queda por descubrir.

La energía oscura

El concepto de energía oscura es más reciente, o quizá sea más antiguo, depende de la lectura que quiera dársele a los acontecimientos históricos relacionados. A pocos

años de haber planteado la Teoría de la Relatividad General, Einstein se vio en la necesidad de modificar su ecuación de campo, porque tal y como estaba planteada (y siendo la gravedad, el parámetro dominante entre los objetos masivos del Universo descrito por la teoría), resultaba que si el Universo había existido por siempre (que era lo que él pensaba), la gravitación tendría que estar trabajando en colapsarlo, y si no lo había logrado, la única explicación estaba en que debía existir algún parámetro, una fuerza antigravitatoria que impidiese su colapso; por esa razón (y no por el capricho de un genio, como se dijo, sino por necesidad y de manera visionaria), Einstein incluyó la constante cosmológica, que mantenía (contra la gravedad de los objetos materiales) las cosas en su sitio. Sin embargo las cosas tomaron otro rumbo desde el momento en que Edwin Hubble descubrió (a partir del efecto Doppler observado en la luz proveniente de muchas galaxias) que la mayoría de las otras galaxias se alejan de la nuestra y se alejan unas de otras. Recordemos que aquello fue interpretado de una manera que a todos resultó tan evidente como sorprendente: si las galaxias se alejan, entonces el Universo se está expandiendo. Como este descubrimiento hizo surgir (al menos, en una parte del mundo científico), la idea de que el Universo tuvo su origen a partir de un punto (el Big Bang), porque si algo se está alejando, entonces antes estuvo más junto. El análisis permitía pensar que los grandes objetos del Universo (las galaxias), se alejaban porque aún no se había agotado ese impulso inicial del Big Bang. En ese escenario, la necesidad de una constante cosmológica que se asegurase de mantener separados los objetos del Universo, resultó innecesaria, porque habría sido el impulso remanente del Big Bang, el que mantenía las grandes estructuras separadas y alejándose, y pasó al olvido cuando Einstein lo reconoció como la "mayor pifia de su carrera".

De modo que razonablemente, hacia finales del siglo XX, aún se pensaba que el desplazamiento al rojo observado

en la luz de las galaxias, se debía a que ellas se alejan de nosotros. Sin embargo, el conocimiento del Universo es como una inagotable caja de sorpresas.

El año 2011, Riess, Perlmutter y Schmidt obtuvieron el Premio Nobel de Física, por el descubrimiento de que el Universo se está expandiendo en forma acelerada. Esto pone de manifiesto varias cosas: el desplazamiento al rojo de las galaxias, no correspondería al efecto Doppler; no se debería a que sean las galaxias quienes se están desplazando, alejándose unas de otras a través del espacio, con una velocidad cada vez mayor... Estaría ocurriendo algo mucho más desafiante para la Ciencia, y totalmente inesperado: en el espacio intergaláctico se estaría "creando" espacio nuevo, y esto ocurriría a gran velocidad, separando los objetos del Universo. Esto se originaría en una energía, hasta ahora desconocida; una energía oscura, que se manifiesta de manera antigravitatoria, tal como lo hacía la vieja constante cosmológica que había propuesto Einstein.

Asimilando que la energía oscura se comporta como la constante cosmológica, hoy se piensa que Einstein no estaba equivocado, sin embargo, el valor que se predice para dicha constante es muy distinto del valor medido; tanto, que se le considera la peor predicción en la historia de la Física. Para resolver este "detalle no menor", quizá se precisa de una teoría nueva, tal vez es tiempo, de que surja un nuevo/a genio/a, alguien que como Einstein, tenga suficiente intuición, para realizar la pregunta adecuada y, por cierto, la perseverancia para dar con la respuesta.

A fin de cuentas, el conocimiento más completo del Universo, lo tenemos sólo para un 5% de la materia-energía que lo compone; el resto, por ahora es un misterio. Si usted está el día de hoy, tan positivo como un protón, le sugiero pensar que aún nos queda otro 95% del Universo para maravillarnos.

Corroborando la Teoría del Big Bang inflacionaria

El principio cosmológico dice que a gran escala, el Universo ha de ser isótropo. Sin embargo, si a escala más pequeña, el Universo siguiese siendo isótropo, costaría explicar el surgimiento de las grandes estructuras existentes en él. Para estudiar la isotropía, se ha registrado la radiación de fondo de microondas, y se han enviado sondas al espacio exterior, cuyo propósito es determinar todas las propiedades de esa radiación. Primero fue la sonda COBE (Cosmic Background Explorer), lanzada al espacio por la NASA en 1989. Ella permitió concluir, entre otras cosas, que la radiación de fondo presentaba el espectro de un cuerpo negro a casi 3°K (si leyó el capítulo II, verá que la radiación de fondo se comporta como si proviniese de un cuerpo negro, y el Universo sería la cavidad de ese cuerpo negro). Luego en el 2001, fue enviada al espacio la sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), también de la NASA, cuyo principal objetivo era obtener información del Universo temprano. Además, la WMAP, permitió determinar con mayor precisión la edad del Universo; reportó la existencia de helio en el Universo temprano, en las proporciones estimadas por la teoría; aportó información sobre la forma plana del Universo; y analizó los porcentajes de energía oscura, materia oscura y materia ordinaria (que es realmente la materia conocida de las estrellas, de los jacintos y de nosotros). También se registraron las pequeñísimas fluctuaciones de temperatura que presenta la radiación de fondo de microondas, es decir, pequeñas anisotropías, porque son esas fluctuaciones las que permiten explicar el surgimiento de las grandes estructuras existentes (galaxias y cúmulos de galaxias); pues bien, la anisotropía fue verificada a grandes rasgos por la WMAP, y confirmada con mayor precisión, entre los años 2009 y 2013, por la sonda Planck (del observatorio espacial europeo, ESA, por su sigla en inglés). Planck, ha

permitido corroborar, que la edad del Universo es cercana a 13.800 millones de años.

Un objeto que emitió luz hace 13.000 millones de años, de existir hoy, debido a que el Universo se expande, estaría muchísimo más lejos. Se ha calculado, que si un objeto emitió su luz cercano al origen del Universo, hoy estaría a unos 45.000 años luz de nosotros, lo que nos da un diámetro de Universo de unos 90.000 años luz; pero, cuidado, esa es la parte del Universo de la que es posible obtener información (aunque, no tal como es ahora, sino como era en el pasado, teniendo en cuenta lo que tarda la luz en arribar a la Tierra), por eso se le llama Universo observable; todo el Universo restante, nunca estará al alcance ni del mejor instrumento. No obstante, los científicos del área consideran que, con la información recabada, la descripción que se hace del Universo temprano, dispone de resultados confiables que corroboran sus afirmaciones.

Ciertamente, hablar del origen del Universo; de la serie de transformaciones vertiginosas que le tomaron más o menos 3 minutos; del enfriamiento posterior que tardó 380.000 años, hasta que la temperatura llegó a 3000 K; asimilar que sólo entonces afloró la luz, y que esa luz tan antigua se encuentra aún entre nosotros, parece ciencia ficción... parece poesía... pero es Ciencia.

He ahí la maravilla.

“... de noche, su único lugar en el mundo era ese altillo minimalista, provisto apenas de un ventanuco, que a cielo despejado, le repartía cuatro fragmentos de la Vía Láctea”.



DE BÚHOS Y ALONDRAS

Alen era una alondra. Eso decía de ella, cada vez que la veía levantarse tan temprano, quien fuera el compañero de su vida.

Él le había enseñado a ella porqué brillan las estrellas, y ella le había enseñado a él, todo lo que había aprendido, en parte de Ricitos de Oro, en parte de su abuelo; que la naturaleza de las cosas, sigue el curso de unas condiciones óptimas, aunque esas condiciones óptimas nos parezcan complejas e inesperadas.

Aqué había sido un día largo, lleno de detalles. La noche anterior había llovido furiosamente. El cielo había desplomado con pasión, un torrente que se estrellaba contra el techo de zinc, que cubría el altillo donde Alen había dormido cuando era una niña, y donde dormiría ahora que estaba de vuelta.

De día, toda la casa, y el sendero, y el bosque, y hasta el río, era ella; de noche, su único lugar en el mundo era ese altillo minimalista, provisto apenas de un ventanuco, que a cielo despejado, le repartía cuatro fragmentos de la Vía Láctea. Entonces, Alen jugaba a encontrarse con esa niña que la habitaba, y volvía a sentir en el cuarto de la planta baja, en su sueño apacible, al abuelo.

Embragada en la belleza de la nostalgia, Alen se levantó temprano, encendió el fogón, calentó la olla con piñones, y se sentó a la mesa, a saborear de uno en uno aquellos frutos, aspirando a pausas, el aroma incitante que emanaba entre las revoltosas volutas de su tazón de café de trigo. Pensaba que había olvidado, pero sus músculos, sus huesos, sus sentidos, lo recordaban todo. Se le iba el día entre la huerta, las aves, las reparaciones de la cerca que estaban a su alcance... Pero ese día estaba despejado, así es que debía prepararse porque tendría actividad nocturna.

Hacía unos años, habían construido en un promontorio alejado del camino, una especie de torreta donde habían instalado el equipamiento para observar el cielo. Ahora le habían adosado una pequeña sala, y en ella, un proyector.

De pronto, el día tan lento se volvió vertiginoso. Decidió preparar la sala, tener todo listo para cuando arribase su adorado experto, con el grupo de visitantes que se habían inscrito los días anteriores, que llevaban una semana en el pueblo, esperando que dejase de llover.

No era para nada razonable instalar un observatorio, en un lugar que pasa de nublado a lluvioso; le había aconsejado el experto. «Pertenezco a ese lugar, no tendría sentido en otra parte», fue su única respuesta.

El caso es que anocheció, llegaron los turistas, les hizo pasar, y les pidió que se sintiesen como en casa.

Y eso hicieron; se comieron los catutos con miel, los piñones que quedaban en la olla, las sopapillas blancas con merkén, y no paraban de encontrarlo todo ¡tan rico! Como se le hizo poco el café con malicia, les terminó ofreciendo mate de leche, que aguardando cada quien su turno, devoraron con fruición, y como el experto aún no llegaba, Alen no tuvo más remedio que llevarlos hacia la torreta, y adentrarlos a la salita anexa del diminuto observatorio.

Y comenzó la presentación; les habló de su abuelo, de la niña en la cabaña de los tres osos, de su conversación improbable con un rayo de sol, de la suerte de haber perdido a Palurdo y haber encontrado al amor de su vida. Les contó que, entre sus grandes amores, conocer el misterio que se esconde en un cielo estrellado, se había vuelto para ella un sentimiento poderoso. Les contó cuándo, les contó por qué...

Era casi media noche cuando el experto, el astrónomo, se asomó por la puerta.

El público, que desconocía la secuencia de la presentación, asumió que la primera parte, la emotiva y amena charla que se anunciaba en el afiche turístico, no era otra que la que aquella energética anciana les había ofrecido, y subieron a la torreta, a la espera de las observaciones que complementarían la experiencia.

Alen dirigió una mirada recriminadora a aquel hombre moreno, hermoso, tan querido para ella.

«Lo siento», dijo él, antes de subir a la torreta, pero fue sólo por decir; en la sonrisa de Alen, ya sabía el mocetón, que su abuela le había perdonado.

CONCEPTOS CLAVE: Teoría Estándar del Big Bang con etapa inflacionaria, Tiempo de Planck, Longitud de Planck, Fluctuación cuántica del vacío, Velocidad de la luz, Relatividad Especial, Relatividad General, Sistema de referencia inercial, Fusión nuclear de hidrógeno, Cadena protón-protón, Defecto de masa, Espacio-tiempo, Principio de equivalencia, Geodésica, Constante cosmológica, Parámetro de Hubble, Principio cosmológico, Cefeidas variables, Radiación de fondo de microondas, Problema del horizonte, Planitud, Materia Oscura, Energía oscura.

4

Nacidas para brillar

“Parte de los átomos que hay en nuestro cuerpo, proviene del corazón candente de un sol lejano... Y no sólo eso... es más que probable que tengamos millones de átomos de cualquiera de los personajes histórico que puedas nombrar”.

Instrucciones para salvar el mundo

Rosa Montero

ESAS LABORIOSAS ESTRELLAS

En este capítulo, se abordará la generación de los elementos químicos. El nombre de pila, dado al proceso de sintetizar/generar nuevos elementos, es “nucleosíntesis”, y como ocurre al interior de las estrellas, también se le pone un apellido; entonces, hablamos de “nucleosíntesis estelar”. En el capítulo I están descritos los aspectos esenciales, necesarios para comprender el tipo de cambio que sucede en los núcleos atómicos al sintetizarse nuevos elementos químicos.

El modelo teórico, postula que los elementos químicos han podido ser generados en varios momentos diferentes:

a) Nucleosíntesis primordial: Durante el Big Bang, ya se habían generado todos los núcleos de hidrógeno (H) que conocemos. Allí, también surgieron núcleos de helio (He), y aunque poquísimos, núcleos de litio (Li). Los electrones, estuvieron por casi 380.000 años separados de los núcleos.

b) Desde el helio (He) hasta el hierro (Fe), los elementos son “cocinados” al interior de las

estrellas: Una estrella mediana (como nuestro Sol), llegará a fusionar hasta el elemento carbono; de allí en adelante, tendrá los días contados. Sin embargo, en las

estrellas masivas se sintetiza hasta el elemento hierro (Fe), es decir, las estrellas grandes realizan una labor que permite avanzar, considerablemente, en la tabla periódica.

c) Elementos más pesados (desde Fe en adelante) son sintetizados en el estallido de una supernova:

Los elementos pesados, también pueden generarse tras el choque de estrellas de neutrones. La reciente detección de ondas gravitacionales, a partir de dos estrellas de neutrones (en el año 2017), permitió registrar elementos muy pesados, por ejemplo, oro y platino.

DIARIO ÍNTIMO DEL SOL (Y SU ESTRECHA RELACIÓN CON LA TIERRA)

INFORMACIÓN CLASIFICADA PROHIBIDA SU DIVULGACIÓN EN MARTE **NO LEER**

Nuestro planeta tiene la edad del Sistema Solar, unos 4.600 millones de años. La vida ha sido posible en nuestro planeta, porque estamos a la distancia precisa de una estrella mediana. La distancia precisa es un intervalo bastante estrecho, teniendo en cuenta la inmensidad del Sistema Solar. Estar a la distancia adecuada, permite la existencia de agua líquida. De estar más cerca el Sol, nuestro planeta sería árido, desértico, o de estar más lejos, estaría congelado.

El núcleo de la Tierra es de hierro fundido. El hierro (Fe) tiene propiedades magnéticas, eso permite generar, en torno al planeta, un enorme campo magnético que nos protege del bombardeo de rayos cósmicos y de partículas extremadamente energéticas. De ingresar, esas partículas a nuestra atmósfera, causarían daño a los seres vivos, y la vida no hubiese sido posible. En realidad, el campo magnético desvía tales partículas hacia los polos, generando las hermosas y ocasionales, auroras boreales (o australes).

La Tierra, llevaba unos 100 millones de años en su órbita como planeta caliente, cuando un objeto de tamaño cercano al de Marte, habría hecho colisión con ella; le habría arrancado un gran trozo, dando origen a la Luna. Un acontecimiento así, hoy, sería el desastre final para nosotros; sin embargo, que haya sucedido tempranamente, fue una fortuna, porque gracias a eso, tenemos un satélite natural. Y es que la Luna, no sólo tiene un papel romántico; en un comienzo, giraba mucho más

cerca de la Tierra; las mareas, ocasionadas por la gravedad de la Luna, debieron ser megatsunamis. La presencia de la Luna, logró estabilizar el eje de la Tierra. Durante su traslación en torno al Sol, el eje de la Tierra no es perpendicular al plano de su órbita, sino que está inclinado en unos 23° . Esta inclinación permite que se sucedan, una tras otra, las estaciones del año. La presencia de Júpiter en una órbita cercana (por su tamaño y gravedad), le ha llevado a comportarse como “el guardián de los planetas”, protegiéndonos de posteriores colisiones con cometas y/o meteoritos.

Estamos aquí, porque nuestra estrella (el Sol) está quemando hidrógeno para producir helio, y por cada átomo de helio que se genera, solamente un 0,7% de la masa involucrada en la transformación, se convierte en energía. Tal vez no parece mucho, sin embargo, esa es la energía que conviene a la vida; la que mantiene la temperatura media de la Tierra a unos 15°C , con variaciones, que en los extremos, van desde -60°C en zonas polares hasta 55°C en el desierto. Curiosamente, la probabilidad de que en el Sol, el hidrógeno se fusione para dar helio, es realmente muy baja. Sí, es baja, y por eso estamos aquí; aunque parezca increíble, eso es justo lo que necesitábamos para existir. Si la probabilidad fuese mayor, la quema de hidrógeno hubiese sido más rápida, y la vida del Sol hubiese sido tan corta, que no hubiese dado tiempo al surgimiento de la vida biológica.

Una estrella masiva, consume su combustible en forma apresurada, y llegan a pasarle cosas maravillosas... pero su vida es corta. Puede llegar a vivir 10 millones de años, tiempo muy breve para propiciar condiciones que permitan la existencia de planetas con vida, porque la evolución de seres vivos, toma tiempo. Comparativamente, se considera que el Sol es una estrella de baja masa; gracias a eso, ha podido estar mucho más tiempo quemando su combustible. Se estima que el origen de la vida data de unos 600 millones de años,

después de que el Sol se encendió, y se ha determinado que Eva (la requeteabuela africana, de la que todos descendemos), salió a caminar por África, hace sólo 200 mil años.

Parece inconcebible, que se haya requerido de todas aquellas condiciones sucesivas o conjuntas, para que, después de miles de millones de años, llegásemos a existir: a producir tecnología, a crear belleza, a cuestionar desde todos los ángulos de la naturaleza humana (desde el arte dramático hasta el rigor científico) el porqué del origen y el para qué de un incierto destino; sin embargo, en esa marabunta de preguntas que no pocas veces nos consumen el entendimiento, el mayor misterio de todos, sigue siendo el origen de la vida, porque la vida no sólo es complicada vivirla; ocurre que desde su mismo origen, siempre lo fue.

UNA DIGRESIÓN SOBRE LAS COMPLICACIONES DE LA VIDA

Cuando la Tierra era joven, hubo un período en que fue profusamente bombardeada por meteoritos. Existe evidencia que, una vez que cesó el bombardeo, hace unos 3.500 millones de años, comenzó la vida sobre nuestro planeta. ¿Significa eso, que las moléculas apropiadas para la vida, venían en los meteoritos? Por ahora no tenemos cómo saberlo, pero la vida que surgió en principio, habría sido anaeróbica y acuática, porque sobre la superficie de la Tierra, la radiación ultravioleta era una completa amenaza; no había capa de ozono para proteger la atmósfera, porque no había suficiente oxígeno para generarla.

Existe un tipo de bacterias, conocidas como “cianobacterias primitivas” o “algas verdeazuladas”, de las que se piensa que fueron responsables de crear el ambiente aeróbico del que disfrutamos; en algún momento, ellas comenzaron a generar oxígeno. Si uno

se pregunta, ¿por qué empezaron a generar oxígeno? La respuesta más simple que surge, es que tal vez estaban pasando hambre; como el hambre puede llevar a la extinción, se “las arreglaron” (vale decir, se adaptaron), impulsando procesos que les permitiesen generar (con los ingredientes disponibles), su propio alimento; había dióxido de carbono, había agua y había luz solar; entonces, estas cianobacterias inventaron la fotosíntesis, produciendo hidratos de carbono para subsistir, cuyo producto de desecho, eran moléculas de oxígeno.

Si las cianobacterias eran muchas, mucho ha de haber sido su desecho, lo que, para la nascente vida del planeta, no ha de haber sido un problema menor; porque de haber habido otro tipo de bacterias anaeróbicas allí presentes, han de haber fallecido intoxicadas por el oxígeno. A la larga, se habría acumulado suficiente oxígeno, como para generar la capa de ozono protectora frente a la radiación ultravioleta del Sol, permitiendo así, el florecimiento de la diversidad de la vida.

Se supone, que en algún momento de la evolución, entre las cianobacterias y las células de las plantas, se produjo “endosimbiosis”; esto significa, que las cianobacterias habrían sido fagocitadas por células vegetales, es decir, las células de las plantas engulleron a las cianobacterias, pero no las desintegraron, sino que les permitieron seguir funcionando atrapadas allí. De la cianobacteria; la célula vegetal obtenía energía y alimentos (producto de la fotosíntesis que la célula engullida siguió realizando). Como parte del proceso evolutivo, estas cianobacterias primitivas constituirían, más tarde y hasta ahora, los organelos de las plantas verdes, conocidos como “cloroplastos”; que proveen energía, sintetizan el alimento y también algunas otras moléculas complejas, necesarias para la vida vegetal.

No obstante, hay que añadir, que el oxígeno es tóxico, no sólo para los microorganismos anaeróbicos. Este elemento es indispensable para la vida, pero su potencial

tóxico es tan grande, que los seres vivos han generado mecanismos de adaptación para utilizar el oxígeno, y a la vez, evitar el perjuicio que puede generar en los tejidos. Pero, ¿de dónde proviene la toxicidad del oxígeno? El problema reside en los electrones desapareados.

Tanto en los átomos, como en los enlaces entre átomos, los electrones se encuentran en regiones que podemos visualizar como “departamentos para vida en pareja”, y que (como se dijo en el capítulo I), reciben el glamuroso nombre de “orbitales”, cada orbital tiene cupo para dos electrones, a condición de acomodarse según ciertas reglas (que dicta la naturaleza y que la Mecánica Cuántica predice acertadamente). Un enlace se produce entre dos átomos que deciden compartir dos electrones en un orbital nuevo, “construido” con la participación de ambos átomos. El enlace puede involucrar elementos diferentes, o átomos de un mismo elemento, como es el caso del O_2 que respiramos. Los elementos realizan enlaces, porque en el proceso de compartir electrones (de valencia, electrones externos), cada átomo participante gana estabilidad. Si en un orbital queda un electrón solitario; se dice que aquel está desapareado, y en ese caso, el átomo (o grupo de átomos), con su(s) electrón(es) desapareado(s), constituye un “radical libre”. En el proceso de buscarle un compañero a ese electrón (o de entregarle a otra especie, el electrón que sobra), el radical suele causar daño a otras moléculas. La molécula de oxígeno (O_2) tiene características de radical porque posee dos electrones solitarios en orbitales diferentes, es decir, posee electrones desapareados; el O_2 quiere solucionar aquello, quiere que sus electrones estén apareados; él sólo quiere hacerse más estable, pero le resulta difícil encontrar moléculas de quienes obtener dos electrones al mismo tiempo, y por eso va capturando electrones de uno en uno, generando en el proceso, más daño que el que intenta solucionar, originando especies tales como; radical superóxido, radical hidroperóxido, y radical hidroxilo (el

más peligroso). Todos estos radicales libres, tienen un electrón desapareado y ansioso de atacar tejidos, órganos, y de causar destrucción celular, sólo para estabilizarse.

«Sólo necesito poder respirar, para amarte», declaraba el estribillo de una vieja canción... El oxígeno es, a fin de cuentas, como uno de esos amores tóxicos que nos nublan la visión en la adolescencia y nos llevan, no sólo a perder el decoro, sino hasta la razón (si ya se es mayorcito). El oxígeno ha puesto de su parte para permitirnos ser quienes somos, pero es, a la vez, la causa evidente de nuestra perdición. Por acción del oxígeno; nos oxidamos, envejecemos, enfermamos y morimos... Es la vida.

NO ES LO MISMO SER BRILLANTE, QUE SER LUMINOSA

Volvamos a lo nuestro. A la luz, que proviene de cuerpos celestes y que puede observarse en una noche estrellada, los astrónomos le llaman "magnitud aparente"; porque el brillo que vemos no indica, en forma directa, lo luminosa que es una estrella. La luz que se ve, depende de qué tan lejos está el astro que la emite. Además, parte de la luz original, ha sido absorbida por el espacio interestelar que ha debido atravesar. La verdadera luminosidad, es una propiedad intrínseca de la estrella, y corresponde a la cantidad de radiación, que atraviesa cierta superficie de la estrella en un tiempo determinado, por ejemplo, un cm^2 en un segundo.

En la Antigua Grecia, Hiparco de Nicea (siglo II antes de Cristo) hizo una clasificación "al ojo", en que distinguió 6 categorías de estrellas: a las más brillantes, las llamó de "primera magnitud" y a las menos brillantes, las llamó de "sexta magnitud". En el siglo XIX, quedó claro que las de "primera magnitud" eran 100 veces más brillantes que las de "sexta". Terminó resultando que, mientras más grande y positivo es el número, menos brillante es la estrella, y

que un astro verdaderamente brillante, tiene una magnitud cuyo valor es un número grande, pero negativo. (Si gusta de los números, le comento que esta escala es logarítmica con base 2,5)

Cuando se interrumpe el suministro eléctrico, basta con poner una vela en una palmatoria para iluminar nuestro cuarto, pero si una tía se lleva la vela con palmatoria incluida, y avanza por el pasillo de la casa, el brillo de esa luz irá disminuyendo en forma matemáticamente bien conocida. Existen varias relaciones en la Física, cuya disminución con la distancia ocurre de manera similar, se le llama "ley de inversa del cuadrado de la distancia"; funciona en la fuerza de atracción gravitacional (ley de gravitación universal de Newton), en la interacción entre cargas eléctricas, y en la intensidad con que disminuye la luz a partir de la fuente que la origina (como le pasa a la luz de la vela que lleva la tía en su mano).

Los astrónomos, dedujeron a partir de la ley matemática; una relación entre la distancia de una estrella, el brillo aparente (magnitud aparente) y la luminosidad (intrínseca), y determinaron cuál sería el brillo de cada una de esas estrellas, si se encontrasen arbitrariamente a 32 años luz de nuestro Sistema Solar (recuerde que un año luz, corresponde a la distancia que recorre la luz en un año). Al parámetro así obtenido, se le llama "magnitud absoluta" y permite hacer comparaciones de la luz emitida, independiente de si la estrella realmente está más cerca o más lejos. Por ejemplo, comparemos al Sol con una estrella brillante del cielo. La magnitud aparente del Sol es -27 (que es un valor muy grande y muy negativo, eso significa muy brillante). Canopus es la segunda estrella más brillante de nuestro cielo nocturno, después de Sirio. La magnitud aparente de Canopus es $-0,65$, es decir, se ve claramente porque es negativa, pero obviamente, es mucho menos brillante que nuestro Sol. El Sol se encuentra a ocho minutos-luz de la Tierra, y Canopus está a 312 años-luz; es bien injusta la comparación para Canopus. Comparemos

ahora los valores de las magnitudes absolutas, como si el Sol y Canopus estuviesen alejados de nosotros, ambos, a la distancia de 32 años-luz. La magnitud absoluta de Canopus es -5,5; ¡brillante!; en tanto el Sol a esa distancia, se vería con una magnitud de 4,5. ¡Ups! Sería una estrella muy tenue, recordemos que 6, es la última magnitud factible de ver a ojo desnudo.

Nota aparte, merece decir, que en el proceso de clasificación de las estrellas, a fines del siglo XIX y adentrado el siglo XX, se empleaba a muchas mujeres por la prolijidad de su trabajo y porque les pagaban poco; para colmo, se suponía que realizaban una tarea que finalmente no comprendían, y no se esperaba de ellas una labor destacada, ni mucho menos, creativa. Sin embargo, a pesar de las desventajas comparativas, algunas de esas mujeres se lucieron a tal punto, que no fue posible ocultar su luminosidad; al respecto, pueden destacarse las contribuciones realizadas por **Annie Jump Cannon**, en la clasificación de espectros de miles de estrellas (hasta de novena magnitud), y desde luego, la valiosísima contribución de **Henrietta Swan Leavitt**, cuyo aporte fue descubrir que en cierto tipo de estrellas, llamadas "Cefeidas variables", se podía relacionar el período con la luminosidad de la misma (se llaman "variables" porque su luminosidad varía con el tiempo en forma periódica; aumenta, disminuye, aumenta, disminuye).

Sucedee, que algunas estrellas experimentan pulsaciones en la luminosidad que emiten; la pulsación es causada porque la estrella se expande y se contrae, de tal modo, que se hace más luminosa al contraerse, y menos al expandirse. Esto no es raro. Al contraerse, a la estrella le aumentan la presión y la temperatura, y le disminuye el área superficial; se hará más luminosa. Aunque en 1904 se desconocía la causa del fenómeno, Henrietta estudió los períodos de variación de luminosidad para muchas estrellas del tipo Cefeida (que están en una galaxia llamada nube pequeña de Magallanes; ésta orbita la Vía

Láctea y puede verse como una mancha neblinosa, desde el hemisferio sur). El nombre "Cefeida", procede de la estrella δ Cephei. Henrietta representó gráficamente el período y la luminosidad de una gran cantidad de Cefeidas variables, proporcionando con ello, un método para medir distancias de estrellas más lejanas. Si se encuentra una Cefeida variable en una galaxia vecina, y se determina su período de variación, se la puede comparar con una estrella variable conocida, cuyo período de variación sea igual; así, puede inferirse que ambas estrellas tienen la misma luminosidad intrínseca, y si una se ve más débil que la otra, es simplemente porque está más lejos. Si se conoce la distancia a que se encuentra la estrella de referencia, puede determinarse la distancia de la estrella en estudio. Con los años, algunos cálculos iniciales debieron corregirse, porque no todas las estrellas pulsantes eran realmente el tipo de Cefeidas que había estudiado Henrietta (en la nube de Magallanes), sin embargo, a partir de entonces, si en una constelación se encuentra una Cefeida variable; se le mide su período, se determina su luminosidad, y eso permite calcular la distancia a la que se encuentra esa estrella y/o su constelación. ¡Grande Henrietta.

EL DIAGRAMA HR

Como comentamos en el capítulo II, al estudiar la luz que proviene de una estrella, se puede determinar los elementos que componen su atmósfera; ese procedimiento se llama "análisis espectral" y define el tipo espectral de cada estrella estudiada. También vimos en el capítulo I, cuando estudiamos la radiación del cuerpo negro, que el color que presenta un cuerpo caliente depende de su temperatura.

A fines del siglo XIX e inicios del XX, había muchos científicos estudiando la emisión de luz por cuerpos

calientes, y se llegó a establecer una relación entre el color de un objeto caliente y su temperatura superficial; que aplicado a las estrellas, indica que las estrellas más frías son rojas y tienen una temperatura superficial de unos 3.000 kelvin; las más calientes son azules y su temperatura superficial puede alcanzar los 30.000 kelvin (e incluso 50.000 kelvin), el Sol tiene una temperatura superficial de 6.000 kelvin, y es una estrella amarilla.

En la primera década del siglo XX, el astrónomo danés Ejnar Hertzsprung (en cuyo apellido, languidecen dos vocales en medio de nueve consonantes) y el astrónomo estadounidense Henry Norris Russell, cada uno en forma independiente, habían desarrollado un trabajo que permitiría a la Astronomía, estudiar y comprender (con creciente claridad) los fenómenos que se producen en la evolución de las estrellas.

Hertzsprung y Russell habían observado, y recabado información de muchísimas estrellas, y las ubicaron en un diagrama, que aparece representado en la Figura N° 15, referido comúnmente como diagrama HR. El eje vertical del diagrama representa la luminosidad y el eje horizontal representa el tipo espectral. Sin embargo, el tipo espectral está relacionado con la temperatura superficial de cada estrella (o el color que ella presenta). Según su tipo espectral, se han clasificado en categorías denominadas: O, B, A, F, G, K, M. Existe en español, una manera mnemotécnica de recordarlo, es cuestión de fijarse en las iniciales: “¡Oh, Bienaventurados Aquellos Feligreses!, Gritó Krispin, Mintiendo”. Desde luego, en sus inicios, esta clasificación comenzó con A, B, C, D, pero después, a medida que aumentaba la información que se disponía, algunas categorías se fundieron en una sola y otras cambiaron su ubicación en la lista.

Lo más impresionante del diagrama, es que la mayoría de las estrellas se encuentran en una diagonal conocida como “secuencia principal”, que corresponde a las estrellas que están realizando fusión de hidrógeno (quemando

hidrógeno), para dar helio. De hecho, el Sol se encuentra en la secuencia principal. Las estrellas pasan la mayor parte de su vida en esta etapa. Hacia abajo y a la derecha, las estrellas son más frías; hacia arriba y a la izquierda, son más calientes. En la parte superior a la derecha, están las estrellas que han dejado de quemar hidrógeno, han abandonado la secuencia principal y están viviendo una etapa corta como "gigantes rojas" (o "supergigantes rojas"). Por debajo de la secuencia principal, hay un grupo de estrellas poco luminosas; las "enanas blancas". Cuando el Sol deje de quemar hidrógeno, después de unos 5.000 millones de años más, los procesos posteriores le tomarán (comparativamente) poco tiempo, y a la larga, deberá pasar al sector que agrupa a las "enanas blancas" (si no puede evitarlo, suspire).

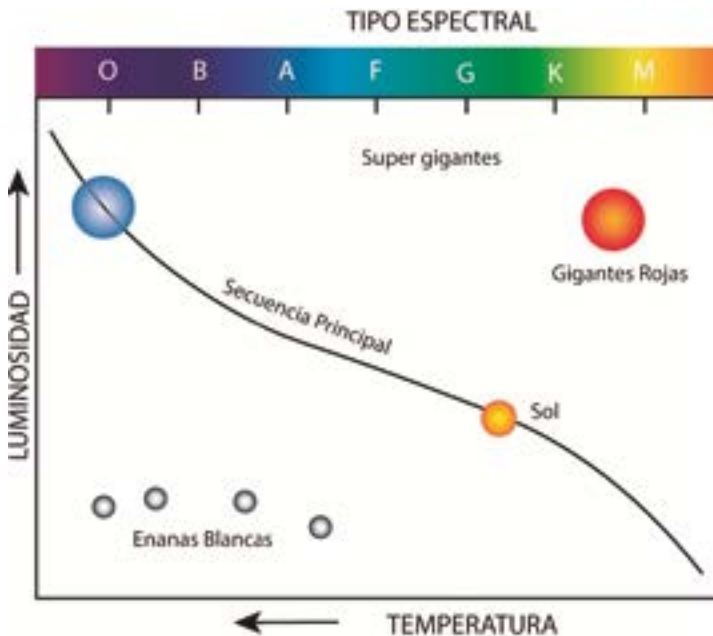


Figura N° 15: Diagrama HR

NUCLEOSÍNTESIS EN UNA ESTRELLA COMO EL SOL

Ya hemos adelantado, que los elementos se forman en procesos que suceden en las estrellas, pero ¿por qué algunos elementos en la Tierra son tan abundantes y otros tan escasos?, ¿todos los elementos conocidos, coincidirán en su origen?

Fue una mujer británica, **Cecilia Payne-Gaposchkin**, quien sostuvo en su tesis doctoral (presentada en Harvard en 1925), que la composición de las estrellas era principalmente hidrógeno. Su tesis fue calificada como brillante, no obstante, los astrónomos de la época pensaban que era errónea; suponían que la composición del Sol era similar a la de la Tierra. Pasaron varios años para asimilar que, efectivamente, el principal componente del Sol y las estrellas es hidrógeno; en cuanto a Cecilia Payne, recién en 1938 se le otorgó su título oficial de astrónoma, y finalmente, tuvo una carrera exitosa en Harvard.

Pues bien, hace unos 4.600 millones de años, una gran masa de gas frío empezó a sentirse atraída por la gravedad. La mayor parte de esa gran masa estaba constituida por hidrógeno. En la medida que se congregaba, la masa de gas comenzó a girar sobre sí misma. De haber sido aquella, la primera vez que esos átomos participaban en ese proceso, hubiese habido solo los elementos que se crearon en el Big Bang (hidrógeno y algo de helio), pero como se sabe que el Sol contiene también otros elementos, se deduce que esos átomos traían un pasado; provenían del estallido de una estrella previa.

La masa de gas reunida, aún no era una estrella, era sólo una enorme bola girando y compactándose, conocida como "protoestrella"; en torno a ella, se formaría un disco que daría origen a los planetas de nuestro Sistema Solar. A medida que la gravedad atraía los átomos hacia el centro del núcleo de la protoestrella, la contracción generaba un aumento de la temperatura; se estaban concentrando

átomos en un volumen cada vez más pequeño, los átomos se movían agitadamente, en consecuencia, aumentaba su temperatura, tanto, que los átomos del volumen central de la esfera, perdieron sus electrones; ya no se trataba de material en fase gaseosa, sino de fase plasma. Cuando esa enorme masa esférica alcanzó en su núcleo (o parte central), los 10 millones de grados, sucedió la maravilla; la estrella se encendió.

De seguro en este relato han de surgir varias inquietudes, entre ellas:

¿Cómo se establece que se llegó a 10 millones de grados?

¿Qué sucedió que decimos que “se encendió”? ¿acaso no estaba lo suficientemente caliente como para verse luminosa, cuando iba en 5 o en 8 millones de grados?

Mediante modelos, se puede determinar la temperatura al interior de una protoestrella, estableciendo cuánto del calor generado en la compactación gravitacional es radiado y cuánto es utilizado para calentar su interior. Mientras no comiencen en el núcleo las reacciones nucleares, esta protoestrella no emite luz visible, sino calor, y sólo podría verse mediante un telescopio para radiación infrarroja, de modo que en rigor, a pesar de su gran temperatura interior, aún no es luminosa.

Cuando en su interior se llega a los 10 millones de grados, se le estará proporcionando a los núcleos de hidrógeno, una condición mínima de energía, como para que pueda tomar lugar (aunque sea poco probable), una reacción nuclear de fusión, cuyo producto será helio.

Podría parecer que 10 millones de grados es realmente una temperatura muy alta y que, habiendo hidrógeno de sobra, la reacción de fusión tendría que ocurrir obligadamente (como de hecho ocurre). Sin embargo, para los científicos, la reacción nuclear en el Sol era difícil de aceptar, porque una cosa son los hechos y otra distinta, la explicación de los hechos. La Ciencia está llamada a comprender los fenómenos, y los científicos

veían un inconveniente tan evidente en el proceso de fusionar hidrógeno para dar helio, que no les resultó sencillo llegar a una explicación razonable.

La reacción de fusión de hidrógeno para dar helio, conocida como "cadena protón-protón", supone conseguir, en su primera etapa, que se aproximen y choquen dos núcleos de hidrógeno; jese era el gran inconveniente!, porque ambos protones tienen carga positiva, lo que les hace repelerse, tal como si hubiese entre ellos una barrera insalvable. La explicación para atravesar esa barrera, vino de la mano de la Mecánica Cuántica y del hecho que la naturaleza presenta comportamiento dual; de partícula y de onda. Si el comportamiento fuese sólo de partícula, sería necesaria una temperatura casi inalcanzable para lograr que estos protones choquen; sin embargo, la naturaleza dual, les permite a las partículas ondulatorias, que a 10 millones de grados, se presente una probabilidad pequeña de que algunas ondas atraviesen la barrera de la repulsión, como si pasasen a través de un túnel, y con ello, dos protones queden ligados.

La situación de ligazón de dos protones es inestable, tanto, que rápidamente uno de los protones de ese matrimonio mal avenido, se convierte en neutrón, con lo que sigue siendo hidrógeno, pero del tipo deuterio (isótopo del hidrógeno). Después, se reúnen dos núcleos de deuterio para formar un núcleo de helio, con 2 protones y un neutrón (^3He), y por último, se reúnen 2 átomos de ^3He para formar ^4He , con lo que la cadena protón-protón, finaliza. El hecho es que, aunque sea poco probable, aunque la temperatura sea de sólo 10 millones de grados, la cadena protón-protón sucede, y es la Mecánica Cuántica la que permite explicarlo satisfactoriamente. Cuando comienza la fusión del hidrógeno, se dice que la estrella se enciende; en ese momento, realmente nace una estrella.

En la estabilidad de una estrella, se considera que participan dos fuerzas contrapuestas: (a) la gravitación, contrayendo la estrella, y (b) la presión termonuclear hacia afuera, que impide que la estrella colapse. Esta es la lucha de fuerzas que mantiene a la estrella en equilibrio; una vez que la reacción nuclear comienza, la energía (contenida en el volumen del núcleo de la estrella) genera continuamente la presión que consigue frenar la contracción que propone la gravedad. Este juego de fuerzas está presente durante toda la vida de una estrella; es lo que la sostiene. Tarde o temprano, una de las fuerzas vencerá y la estrella se transformará en un objeto distinto.

De modo que, cuando leemos el Diario Íntimo del Sol, nos enteramos que la gravedad consiguió comprimir el material de esta estrella, a tal punto, hasta alcanzar una temperatura de 10 millones de grados, y que cuando lo hizo, no estaba apostando por ganar la partida; sólo consiguió crear las condiciones suficientes para que diese inicio la fusión nuclear del hidrógeno, y en eso se lo ha pasado 4.600 millones de años, y le quedan 5.400 millones de años más para seguir haciéndolo. Siendo la fuerza más débil de la naturaleza, la gravedad, ha de saber tener paciencia.

LA VIDA DE LAS ESTRELLAS SEGÚN SU MASA

La vida y la evolución de las estrellas no son iguales para todas. Curiosamente, esa falta de equidad es la que permite que pasen cosas interesantes. El proceso evolutivo de una estrella y la edad que ella pueda alcanzar, dependen de la masa que posee cuando se enciende.

El proceso comienza con una gran cantidad de gas que se compacta, girando sobre sí misma, calentándose más y más en su interior. Si la masa de gas es menor a 0,08 veces la masa del Sol, es posible que en su interior nunca aumente tanto la temperatura como para que comience

un proceso nuclear de fusión de hidrógeno, por lo tanto, no llegará a encenderse, no le pasarán cosas interesantes, constituirá un objeto pequeño (muy grande para planeta, muy chico para estrella; una “enana marrón”). Estrellas cuya masa es menos de la mitad de la masa del Sol, se conocen como “enanas rojas” y son las estrellas más comunes en la Vía Láctea. No se debe confundir las enanas rojas con las gigantes rojas. Una “enana roja” es una estrella pequeña que está en la secuencia principal del diagrama HR; una “gigante roja” es una estrella que ya salió de la secuencia principal, porque ya no le queda hidrógeno en su núcleo y comienza a quemar el hidrógeno remanente en la cáscara que cubre el núcleo, aumentando enormemente de tamaño.

Estrellas de masa intermedia

Lo que describiremos es válido para una estrella de la masa del Sol y es también lo que acontece a estrellas más grandes, de hasta unas 8 masas solares. Una vez iniciada la fusión del hidrógeno, el proceso tarda miles de millones de años en detenerse. En el núcleo, el Sol es capaz de alcanzar unos 15 millones de grados. Para estrellas de masa mayor que la del sol, adicionalmente a la fusión del hidrógeno, la síntesis de helio puede producirse por otro mecanismo, conocido como “ciclo CNO”; porque se consumen (y/o generan) en él, los elementos carbono, nitrógeno y oxígeno. Cabe destacar, que hay otras vías de generación de oxígeno, pero este es el único mecanismo propuesto, consistente con la existencia del elemento nitrógeno.

El nitrógeno es un pilar de la vida que conocemos; es esencial en la fabricación de proteínas, ácidos nucleicos y otras moléculas necesarias para los seres vivos. Un 78% del aire de nuestra atmósfera es nitrógeno, un 21% oxígeno y el 1% restante, vapor de agua, dióxido de carbono, etc. En el ciclo CNO se comienza con la reacción

del helio; en etapas posteriores se genera nitrógeno, y luego se vuelve a producir helio. Como se trata de un ciclo, el nitrógeno primero se crea y después se utiliza. Lo entretenido, es que la etapa en que se crea nitrógeno es rápida, y la etapa en que “desaparece” (es decir, se utiliza) es lenta, entonces el nitrógeno se acumula.

La composición del Sol en masa, se estima que es aproximadamente tres cuartas partes de hidrógeno y una cuarta parte de helio. Una pequeña fracción, menor a dos centésimas de la masa total, estaría formada por oxígeno, carbono, neón, hierro, nitrógeno, silicio y azufre, que al igual que los elementos presentes en la Tierra, no han sido fabricados en el Sol; han acompañado al Sistema Solar desde su origen, por eso se sabe que provenimos del estallido de una gran estrella anterior. Para los químicos, los metales pesados son un grupo de elementos de densidad alta, que pueden estar presentes disueltos en agua de ríos y mares, y de ser ingeridos son tóxicos, por ejemplo: mercurio, plomo, níquel y cobre. Los astrónomos, llaman “metales pesados” a todos los elementos que no son hidrógeno y helio, y suelen hablar de la “metalicidad” de las estrellas (para no parecer paranoica, no diré que hacen esto para molestar a los químicos, aunque cierto es, que tengo mis aprensiones).

Aún falta mucho para eso, pero cuando cese la fusión del hidrógeno, el Sol se enfriará, entonces, la fuerza gravitacional hará notar de nuevo sus efectos, contrayendo el núcleo de la estrella. Adicionalmente, sobre la corteza de ese núcleo de helio inerte, se seguirá produciendo fusión de hidrógeno, y toda la atmósfera externa, aumentará su volumen. Al expandirse, su superficie se hará más fría, y nuestra estrella se convertirá en una “gigante roja”. Cuando al Sol le suceda esto, su tamaño podría abarcar hasta la órbita de Marte (así es que más nos vale, haber emigrado antes).

Pero, entretanto vive su etapa de “gigante roja”, la estrella podrá seguir experimentando cosas. Mientras

la superficie se expande, como está en proceso de enfriamiento (porque la fusión se apagó), se le da ocasión al núcleo para comprimirse por gravedad, y contrario al verdadero propósito de la gravedad, aumentará otra vez la temperatura interior, pero ahora que no queda hidrógeno para fusionar en el centro, seguirá aumentando hasta alcanzar ¡100 millones de grados!, temperatura que se requiere para comenzar el siguiente proceso nuclear; la fusión del helio. La fusión del helio puede suceder en forma gradual u ocurrir violentamente en alguna zona de la estrella; cuando ocurre en forma violenta, se habla de "flash del helio". ¿Se lo imagina?

Una vez que el Sol comience la fusión del helio, producirá el elemento carbono (C). La manera (o mecanismo) en que se produce la formación del C es particularmente interesante, aunque algo complejo de explicar, sin embargo, es motivador tomar nota de la visión de Edwin Salpeter, quien propuso este mecanismo, y de la perseverancia de Fred Hoyle, el científico británico que lo corroboró experimentalmente a nivel de laboratorio.

Elemento	Protones (Z)	Neutrones (A)
${}^4\text{He}$	2	2
${}^8\text{Be}$	4	4
${}^{12}\text{C}$	6	6

Tabla N° 2

Observando la Tabla N° 2, uno esperaría que, si se funden dos átomos de helio, formen un átomo con 8 entidades en su núcleo (entre protones y neutrones), que pudiera dar lugar al elemento berilio, sin embargo, el ${}^8\text{Be}$ que se forma es muy inestable (no existe ${}^8\text{Be}$ en la naturaleza). Lo que sí sucede, es que se forma abundantemente ${}^{12}\text{C}$. Esto podría suceder si se reunieran

3 núcleos de helio, o si se formase berilio, y luego, este reaccionase con otro núcleo de helio para formar el ^{12}C .

Alrededor de 1950, los astrofísicos no podían explicar satisfactoriamente cómo era posible que se hubiese formado carbono en las estrellas. Sucede que, para cada átomo, se puede asociar y calcular una energía que le es propia y cuando sumaban la energía del ^8Be (inestable) con la energía de un núcleo de helio, la suma resultaba superior a la energía de un átomo de ^{12}C , de modo que suponían que iba por otro lado la explicación de la existencia del ^{12}C . Para Hoyle, el asunto era que si el carbono existía, alguna cosa inesperada estaba haciendo la naturaleza.

El mecanismo propuesto, suponía que ocasionalmente el ^{12}C podía manifestarse de una manera distinta (en energía), a la que se llamó “estado resonante del carbono”; luego, ese ^{12}C podía deshacerse de la energía que le sobraba y volver a la condición normal, denominada “estado basal”.

Hoyle insistía en que se debía buscar el ^{12}C resonante y que, de existir, se explicaría la formación del elemento en la naturaleza. Luego de una conferencia que tuvo que dar en el Caltech (de seguro una charla en contra de la Teoría del Big Bang, que a Hoyle para nada le convenía), le pidió a un amigo suyo, William Fowler, físico nuclear que trabajaba en otro edificio y disponía del equipamiento necesario en sus laboratorios, que buscaran experimentalmente esa resonancia del ^{12}C . Fowler, que trabajaba precisamente en determinar la abundancia de ciertos elementos químicos, le explicó que esa búsqueda no tenía sentido, pero igual tuvo la gentileza de permitir que sus colaboradores ayudasen a Hoyle y... ¡Eureka!; encontraron el carbono (^{12}C) resonante. Como cada núcleo de helio es conocido como “partícula alfa”, y ya que se requieren tres núcleos de helio por cada átomo de carbono que se forma, el proceso de nucleosíntesis del carbono es conocido como proceso “triple alfa”.

El proceso de fusión nuclear de nuevos elementos, se produce en la región de la estrella donde la temperatura es más alta, esto es, al centro; por tanto, al terminar cada etapa, el nuevo elemento creado quedará al centro, y en la cáscara que envuelve ese centro (un poco más fría que su interior), todavía habrá remanentes de su progenitor, formando una estructura de capas (como una cebolla).

Una vez agotado el helio en su centro, si pudiésemos dividir la estrella por la mitad (como las dos semiesferas de una naranja), lo que veríamos es una capa externa de hidrógeno, que todavía queda sin reaccionar; inmediatamente bajo ella, habría una capa de helio, y el centro sería de carbono.

Agotado el helio, nuestra querida estrella, el Sol, se enfriará y la fuerza gravitacional empezará de nuevo a ganar la batalla, y comenzará otra vez la contracción, que a su vez, hará que aumente la temperatura en el centro de la estrella. ¡Y a uno le gustaría que al Sol le siguieran pasando cosas! Pero dado que la masa disponible no es tan alta como se requiere, nunca alcanzará en su centro, sólo por contracción gravitacional, los 600 millones de grados requeridos para el siguiente proceso de fusión nuclear... ¿El Sol dejaría de escribir su diario, si llegase a saberlo?

Cuando de estrellas se trata, la gravedad tiene una sola meta, y es generar un colapso gravitacional, de modo que el Sol, sin reacciones nucleares contra quienes balancear fuerzas, se seguirá comprimiendo. La estrella se acerca a su muerte, y en ese proceso pasará por inestabilidades que la harán desprenderse de las capas más externas, formando lo que se ha dado en llamar "nebulosa planetaria": una hermosa nube de gas que sigue brillante por mucho tiempo, porque recibe la radiación de la masa colapsada en su centro. Ese será el destino final del Sol y de estrellas de hasta unas 8 masas solares.

Serán los electrones los que conseguirán que la estrella no siga colapsando. Los electrones, que en fase plasma están separados de los núcleos, harán uso del derecho

al principio de exclusión de Pauli. Este principio suele plantearse diciendo que, dos electrones en un átomo no pueden tener los cuatro números cuánticos iguales, sin embargo, el significado último del famoso principio de exclusión, es que no puede haber dos partículas materiales ocupando el mismo lugar al mismo tiempo.

De modo que, los electrones “le plantan cara”, “le paran el carro” o “le chantan la moto” a la gravedad; se aferran al principio de exclusión y manifiestan que no pueden tener idénticos estados cuánticos, por mucho que se los comprima; si los electrones pudiesen alzar un lienzo de protesta, se leería: “Presión de degeneración electrónica”. Estos “electrones degenerados” (así es como se le llama a esta condición en que se encuentran) consiguen evitar que el colapso continúe; la estrella que aún está caliente, terminará sus días como una “enana blanca”.

Los elementos químicos pueden presentar más de una estructura en la naturaleza, cuando eso sucede, se dice que el elemento presenta “alótropos”; por ejemplo, el oxígeno tiene como alótropos el O_2 que respiramos y el O_3 (ozono) en la capa que nos protege de la radiación ultravioleta. También el carbono posee alótropos, de los cuales los más conocidos son el carbono grafito y el carbono diamante. El diamante no es otra cosa que carbono que ha sido sometido a las altas presiones de las profundidades de la Tierra. El destino que le espera a los restos mortales del Sol, una vez que se apague y se enfríe, es convertirse en diamante. ¿Habrá alguien para verlo?

Dado el tiempo que una estrella vive, sería imposible haber estudiado una en específico, desde su nacimiento hasta su muerte. El proceso evolutivo que se describe es la consecuencia de observaciones de muchísimas estrellas por separado; de un profundo razonamiento para concatenar los hechos; y si se tiene suerte, de ser testigo viviente de un megaevento estelar, como por ejemplo, de una supernova.

La corta vida de una gran estrella

A menudo se dice que las comparaciones siempre son odiosas, y aparentemente, este también sería el caso. Tiene uno que hacer acopio de amor a la vida y de sabiduría para valorarla, para no sucumbir ante la pequeñez que se experimenta; bien lo decía mi abuelita ¡no somos nada! Cuando se habla de estrellas masivas, se está haciendo referencia a aquellas cuya masa es mayor a 8 masas solares; hasta hace unos 10 años, se consideraba que la mayor estrella debía alcanzar unas 150 masas solares, sin embargo, ese límite ha sido sobrepasado. La estrella más masiva registrada no tiene un nombre interesante, se llama R136a1. Se ha calculado que al nacer, su masa era mayor a 300 masas solares, y que una vez comenzada la combustión de hidrógeno ha ido “adelgazando”; expulsando material, a través de vientos estelares, de modo que actualmente tendría unas 265 masas solares.

El conocimiento de la enormidad de los objetos celestes, podría ser por estos días, causal de depresión crónica. Para evitarlo, debe uno darse a la tarea de poner las cosas en perspectiva; las estrellas muy masivas tienen el don de generar diversos y pesados elementos químicos de la tabla periódica, pero su vida es corta; las estrellas grandotas no pueden llegar a constituir un sistema estelar como nuestro Sistema Solar, que aunque pequeño, alberga vida inteligente. Claro, hay días que a uno todo le sale mal, hace puras leseras y no se siente inteligente; se mira al espejo y se encuentra feo; da vuelta la hoja del calendario y... ¡ups!, decide que no va celebrar más su cumpleaños; todo eso es cierto, sin embargo, según mi experiencia (que tampoco es tan larga como parece), vivir se trata de buscar la gracia a la vida y, si uno llega a encontrarle alguna gracia, hay que colmarla de halagos (a la vida), para que (similar a la higuera, cuando se le dice que es hermosa, siendo que en realidad es fea) la vida se crea el cuento y se nos vuelva

“graciosa”. Si no le resulta, cambie esta lectura por un libro de autoayuda, pero primero termine de leer este (que ya casi, no nos queda nada).

Por encima de 8 masas solares, una estrella puede terminar sus días estallando como supernova. Una estrella masiva será muchísimo más luminosa y agotará su combustible en menor tiempo. Al ser tan grande, la atracción gravitatoria es, comparativamente, superlativa. Una vez que alcance los 10 millones de grados, la estrella se encenderá, y teniendo tanto hidrógeno disponible en su centro para hacer fusión y formar helio, esta etapa del proceso le tomará poco tiempo. Si el Sol ha de tardar 5.400 millones de años más en quemar el hidrógeno que aún le queda; una estrella súpermasiva (de unas 30 masas solares), puede tardar en quemarlo todo, apenas 10 millones de años.

Las estrellas masivas viven mucho menos que las medianas, y muchísimo menos que las pequeñas. Hay estrellas pequeñas sumamente viejas; de hecho, se ha establecido que existen estrellas pequeñas casi tan viejas como el Universo. Para asimilar que las estrellas grandes viven menos que las pequeñas, nos valdremos de una analogía. El proceso que viven las estrellas, es similar a lo que les sucedió a dos hermanos que fueron separados al nacer: Uno y Otro. A Uno, lo alimentaron a base de arenque, jurel y cochayuyo, y se vio obligado a llevar una vida austera; en cambio Otro, que vivía en la pastelería del frente, de niño comía tortas en exceso y de joven bebía cervezas con entusiasmo... Cuando Uno cumplió 75, como venía haciendo los últimos 30 años, fue al acantilado a lanzar un ramito de violetas a la memoria de Otro, que murió de infarto agudo al miocardio el día de su cumpleaños número 45, ¡en la plenitud de la vida!, porque fue ese día que se enteró que era hermano gemelo del “lagartija seca” (cariñoso apodo con que llamaban a Uno). En resumen, la vida de Otro fue corta porque desde niño estuvo echando toda la carne a la parrilla.

Como quien echa toda la carne a la parrilla, las estrellas grandes queman su combustible muy de prisa. Pero hay que admitirlo, de no ser por las estrellas grandes que viven sus etapas con ardor y locura; no estaríamos aquí. Son ellas las que se dejan llevar por pasiones y generan todos los elementos químicos que han hecho posible la vida que conocemos.

Pues bien, una estrella muy grande será muy eficiente en quemar hidrógeno, producirá helio, y cuando mayoritariamente no quede hidrógeno en el núcleo, las reacciones nucleares cesarán, la estrella disminuirá su temperatura y entrará en competencia la fuerza que siempre está presente (pero que no siempre va ganando): la fuerza gravitacional. **Hágase a la idea; toda la evolución de una estrella sucede por sucesivas contracciones y expansiones. En cada etapa, la enorme gravedad tiene un solo propósito, y es que la estrella se contraiga; al hacer esto consigue (antes de hacer colapsar todo ese material candente, que es lo único que quiere), que aumente enormemente la temperatura en el núcleo de la estrella, tanto que en lugar de lograr su objetivo, se enciende una nueva fusión nuclear que genera una enorme energía termonuclear, un verdadero estallido dentro del núcleo de la estrella ¡que nuevamente la hace expandirse!**

En la primera etapa (en que quemaba hidrógeno para dar helio), esta estrella grandota estaba en la secuencia principal del diagrama HR (estaba arriba, a la izquierda), revelando que era una estrella muy caliente, a 30.000 o 50.000 kelvin (y por cierto, muy luminosa). Cuando terminó de quemar hidrógeno, salió de la secuencia principal y se alojó en la zona de las súpergigantes rojas.

El siguiente proceso nuclear (fusionar átomos de helio para producir carbono, también llamado proceso triple alfa), requiere una contracción del centro de la estrella que genere a lo menos 100 millones de grados (eso es lo que

indican los cálculos, cuando se aplican los modelos físico-matemáticos), y tal como le sucederá al Sol, la estrella otra vez se enciende.

Ya dijimos que al Sol, la historia le llega esencialmente hasta la formación de carbono, para que el carbono se fusione y sintetice oxígeno, requiere que la temperatura en el interior del núcleo alcance 600 millones de grados, situación que en el Sol no va a suceder. Cuando todo el helio en el núcleo de la estrella se ha fusionado en carbono, se producen otra vez: el apagamiento, el enfriamiento, la contracción, el calentamiento y el nuevo “encendido”, pero sólo las estrellas masivas y súpermasivas, pueden aumentar aún más su temperatura y seguir participando.

Cierto es que puede haber más de un producto de la fusión del carbono, sin embargo, mencionaremos acá, sólo el modelo más sencillo, que supone que a cada elemento formado se le suman sucesivamente, partículas alfa (o sea, núcleos de ^4He), con lo que los nuevos elementos, van aumentando de 4 en 4 unidades la masa de su núcleo.

De la fusión del carbono (^{12}C) con una partícula alfa, se forma oxígeno (^{16}O). Luego el ^{16}O fusionará con partículas alfa, generando ^{20}Ne , que sumará partículas alfa para dar ^{24}Mg , y luego se generará el ^{28}Si . De ahí en adelante, todo es aún más vertiginoso. Los procesos que siguen, hasta la formación de ^{56}Fe , son todos favorables, generan energía y ocurren muy de prisa; no es necesario apagarse y recurrir a que la gravedad contraiga para generar condiciones de temperatura que prosigan las nucleosíntesis. Los elementos se generan tan espontáneamente, como quien se desliza por un tobogán. Sin embargo, cuando se llega a generar ^{56}Fe , el proceso se detiene.

El empaquetamiento de los nucleones (protones y neutrones) dentro del núcleo de ^{56}Fe es óptimo. Es el núcleo más estable que se conoce, y genera un punto de quiebre en este proceso tan bonito que he venido describiendo. Cuando llegamos al Fe, hemos avanzado

aproximadamente un tercio en la tabla periódica, y es necesario dar cuenta de la formación de otros dos tercios de los elementos existentes en la naturaleza. Lo terrible de que el empaquetamiento del Fe sea óptimo, es que, continuar con las etapas subsecuentes y generar los muchísimos elementos que faltan, ya no produce energía, peor aún, comienza a requerirla (y no es poca la energía que se requiere); supone condiciones de temperatura que parecen inaccesibles... Nada que hacer, entonces... La estrella cesa sus reacciones nucleares. La temperatura de esa colosal estrella, de nuevo comienza a bajar. Otra vez, la fuerza de gravedad manifiesta su poder y contrae a la estrella.

Y si el asunto se ha vuelto cuesta arriba, la pregunta evidente es: ¿cómo se generan los elementos que faltan?

El estallido de una supernova

El año 1054, los chinos y también los árabes, registraron un magno evento que ocurría en el cielo. Apareció una estrella nueva, que en su máximo esplendor, incluso, se podía ver de día. El máximo brillo de Venus tiene una magnitud de -4,4 y la Luna llena de -12,6; el brillo de la estrella nueva que vieron los chinos era de aproximadamente -6. Esa estrella estaba hace mil años a 6500 años luz, sin embargo, se la veía en el cielo más brillante que Venus. Es de imaginar que la gente sintió asombro, quizá terror... Aunque en esa época no lo sabían, se trataba del estallido de una supernova (expresión redundante, porque la supernova no es el objeto estelar, sino el estallido mismo). En su máximo esplendor, durante días o semanas, la supernova puede incluso iluminar más que toda su galaxia. A pesar que constantemente los astrónomos están registrando supernovas en otras galaxias, la última supernova registrada en la Vía Láctea, fue un estallido que se observó en 1604, conocido como "la estrella de Kepler" (que también contempló Galileo). De observarse hoy, un fenómeno de tal magnitud; los

astrónomos estarían felices, los aficionados estarían conmovidos, y los comerciantes venderían “la buena polera de la supernova, pa’ los regalones”, pero de seguro también habría un grupo no menor de personas, esperando, como decía mi abuela, “el acabo del mundo”.

En 1968, los astrónomos Anthony Hewish y Jocelyn Bell, anunciaron el descubrimiento de un tipo de objeto estelar que emitía ondas de radio pulsantes y que fue bautizado tempranamente como “Pulsar”. Desde los años 40, muchos teóricos predecían la existencia de objetos de tales características, y se especulaba que debían corresponder a estrellas de neutrones. Existe una constelación, llamada “del Cangrejo”, que puede verse sólo mediante telescopios muy potentes. El astrónomo italiano Franco Pacini, predijo que en su centro debía existir una estrella de neutrones o “pulsar”, y efectivamente en 1968, después del descubrimiento de Hewish y Bell, se detectó que tal estrella de neutrones, realmente se encuentra allí. El caso es que la constelación del Cangrejo (estrella de neutrones incluida), se encuentra precisamente en la misma región de la bóveda celeste, donde fue reportado por los chinos, el evento del año 1054; es decir, que lo que hay allí son los restos del estallido de una supernova.

Después de sintetizar ^{56}Fe , una estrella masiva se apagará y comenzará a enfriarse. No se dará aquí el detalle de todo lo que se estima que sucede en el proceso de contracción final, pero sí haré mención de los aspectos más relevantes.

Apagada la reacción nuclear, la estrella se enfría. Mientras su centro se contrae, su atmósfera gaseosa se expande. Llega un momento en que el colapso del núcleo de esa estrella, por efecto de la gravedad, es inminente.

¿Quién dijo que todo está perdido?

Los electrones de nuevo alzan sus pancartas: ¡Pauli!, ¡Pauli! Como lo harían en las estrellas pequeñas, recurren a la degeneración electrónica; eso es lo que saben hacer para evitar el colapso, pero ¡ay!, se trata de una estrella

realmente masiva, y no consiguen impedir lo que está sucediendo; el colapso gravitatorio.

La energía colosal del proceso genera fotones tan energéticos, que rompen los núcleos de hierro que se habían formado; este proceso constituye un gasto energético, por tanto contribuye a enfriar el centro de la estrella y acelera el colapso. La temperatura se eleva hasta 1×10^{10} kelvin; ¡todo pasando!, se dispone de energía suficiente para desintegrar muchos de los elementos ya formados. En los procesos de ruptura de los núcleos atómicos, muchísimos neutrones zafan de los núcleos, produciéndose una avalancha de neutrones hacia el centro de la estrella moribunda.

En la fase final, serán los neutrones quienes alcen la voz y las pancartas; serán los neutrones quienes agiten la bandera del principio de exclusión de Pauli, y para oponerse al colapso gravitacional final, se producirá la degeneración neutrónica.

Todo esto sucede muy de prisa; entre tanto, la capa de envoltura no alcanza a percatarse de lo que ocurre en el interior. Debido al colapso, se ha producido un vacío de millones de kilómetros entre la envoltura y el núcleo de la estrella, y en esa circunstancia, la envoltura que contiene los distintos elementos que se han formado sucesivamente, cae sobre el núcleo y durante la caída se encuentra con las condiciones descomunales de temperatura, que le permiten sintetizar en segundos, todos los elementos que de otro modo, no hubiese tenido los medios para fabricar. Finalmente, esa envoltura rebota sobre el núcleo de la estrella y se reparte el material disponible (los elementos de la tabla periódica) hacia el espacio circundante.

En el centro de la estrella agónica, el destino final se aproxima; el objeto que resulte de todo este “caos”, dependerá de la cantidad de masa que se ha contraído. En una estrella masiva, la atracción gravitacional cederá ante la degeneración neutrónica (también llamada presión de

degeneración neutrónica, los neutrones presionan para no colapsar) y terminará sus días convertida en una estrella de neutrones, tal como se registró hace casi mil años, en la constelación del Cangrejo (donde Pacini predijo el pulsar, que se detectó en 1968); en tanto, si se trata de una estrella hipermasiva, la degeneración neutrónica fracasará, el colapso será total, y se convertirá en un agujero negro.

Actualmente hay varias candidatas a supernova en nuestra Vía Láctea: Betelgeuse es una estrella gigante roja ubicada a unos 600 años luz, en la constelación de Orión; hay muchos astrónomos y aficionados que le tienen ganas. No menos atractiva es Eta Carinae, representante del cúmulo de nombre homónimo. Eta Carinae se ha comportado alocadamente los últimos 200 años (que es de lo que se tiene registro), es inestable porque es sumamente grande, su masa es de unas 100 a 150 masas solares. A cualquiera de ellas, podría quedarle poco tiempo. ¿Son 15, son 20, son 30 años o quizá mil años más, los que haya que esperar para verlo? Tratándose del Universo, eso es un abrir y cerrar de ojos.

Durante la lectura del Diario Íntimo del Sol, nos fuimos enterando, de todo el complejo conjunto de condiciones que han hecho posible la vida sobre la Tierra, y que a la larga, ha desembocado en lo que llamamos “vida inteligente”, es decir, en nosotros. De no haber sucedido alguno de aquellos acontecimientos, probablemente no existiríamos. Esta sencilla reflexión, me lleva a compartir con usted, los siguientes párrafos.

BREVES NOTAS SOBRE UNA GRAN HISTORIA

El retorno glorioso de Ricitos de Oro

A partir de los años 80, ha florecido un enfoque amplio, atrevido, ambicioso y sorprendente de la historia del

Universo. Este nuevo enfoque es conocido como “Big History” (o “Gran Historia”, en español). Es una propuesta de Fred Spiers, autor del libro “The Big History of the Humanity” y David Christian, quien trabaja en un proyecto impulsado por Bill Gates, para dar a conocer y lograr, sobre todo en los jóvenes, una toma de consciencia de nuestra situación en el Universo.

Big History se planteó por primera vez, como un curso universitario en la Universidad de Macquarie Sidney Australia, liderado por David Christian, con ayuda de especialistas en la diversidad de temas que supone, y Fred Spier realizó una labor similar en la Universidad de Amsterdam en 1996, que contó con la participación de estudiantes de distintas carreras.

El planteamiento se basa en que han debido suceder en el Universo, dicen ellos, ocho situaciones a las que llaman umbrales y que, de haber ocurrido las cosas en forma diferente, no hubiésemos existido. El proceso al pasar por esos “umbrales” es dependiente de ciertas condiciones óptimas, que los autores llaman Condiciones de “Ricitos de Oro”. ¿Recuerdan a la pequeña niña, que hacía de las suyas en la cabaña de los tres ositos? Ricitos tiene hambre y se da cuenta que uno de los cuencos para comer es demasiado grande y otro es muy pequeño; sólo uno de los 3 cuencos es adecuado para que ella pueda comer y quedar satisfecha. Luego siente sueño y observa que la cama de papá oso es muy grande, la de Osito es demasiado pequeña, sólo hay una camita apropiada para poder dormir cómoda. Pues bien, como Ricitos, la naturaleza espera a que se den las condiciones óptimas para crear estructuras cada vez más complejas; aunque esas condiciones se den en lugares remotos, como en nuestro planeta, por ejemplo. Desde luego, ese proceso le ha tomado tiempo.

Que los seres humanos hayamos llegado a formar sociedades estructuradas, pobladas de redes (culturales, comerciales, de información, etc), es la consecuencia de haber transitado por sucesivos umbrales con resultados

exitosos. A cada uno de estos hechos que ocurrieron; de la manera precisa, en el lugar indicado y en las condiciones óptimas (como si de la historia de Ricitos de Oro se tratase), se le ha dado en llamar “los ocho umbrales de la Gran Historia”. La clave para definir esos umbrales, estaría en la generación creciente de Complejidad. Cada escalón que asciende, permite la formación de estructuras más complejas, y aunque esto supone un enorme costo en energía para la naturaleza, hay otro costo del que se debe estar consciente: a mayor complejidad, mayor el grado de vulnerabilidad de la estructura formada. La complejidad está relacionada con el aumento en el número de componentes que participan en las nuevas estructuras, con la disposición o forma que los componentes adoptan y que, una vez formadas las estructuras complejas, éstas muestren propiedades emergentes, vale decir, propiedades que antes no existían. Aquí es donde Ricitos de Oro entra en acción; las propiedades emergentes sólo tienen lugar si las condiciones son las óptimas: ni muy frío ni muy caliente, ni muy concentrado ni muy diluido...

Los ocho umbrales

El **Big Bang** es el primer umbral, porque plantea la forma más sencilla de surgimiento de complejidad: la formación de protones –además de núcleos de helio–. El caso es que a los 3 minutos de la gran explosión, hacía más de 179 segundos que ya se habían generado todos los protones existentes. (Si usted es joven, ha de saber que todos los átomos de hidrógeno de su cuerpo, son tan viejos como los de su abuelita; si usted es mayor, haga como yo... sonría.) Después del Big Bang, a esperar. Fue cuestión de esperar que bajase la temperatura a unos 3.000 kelvin, o sea, esperar unos 380.000 años para que los electrones se olvidasen de su soltería y decidiesen comprometerse con los protones, para formar los átomos de hidrógeno y de helio, que también había bastante. Listo, cada oveja con

su pareja; la materia prima del Universo estaba preparada para probar todas sus recetas; la nuestra, fue una receta que resultó... bueno, echando a perder se aprende.

El encendido de las estrellas se produjo a unos trescientos, o quizá quinientos, millones de años desde el Big Bang. En su interior comienza la fusión nuclear del hidrógeno para hacer la nucleosíntesis de helio. Para que el encendido se produzca, se requiere mucha energía, la temperatura debe ser sobre los 10 millones de grados. Esta temperatura se alcanza a expensas de que la gravedad, en distintos lugares del joven Universo, ha convocado a las masas a reunirse. Si la fuerza gravitatoria fuese más débil, nunca estrella alguna hubiese llegado a encender.

La generación de elementos químicos se produce en las estrellas a partir de la lucha constante que da la fuerza gravitacional, cuyo derrotero es hacer colapsar por gravedad, a la estrella que sea... En el proceso, lo que la gravedad consigue es que aumente muchísimo la temperatura de la parte central, el núcleo de lo que (si va a encenderse por primera vez) aún es una protoestrella, pero, una y otra vez, la gravedad no ve cumplido sus propósitos; por el contrario, al aumentar la temperatura, le cede el paso a las reacciones nucleares que expanden la estrella. Se trata de procesos de fusión nuclear, que generan nuevos elementos químicos.

La formación del Sistema Solar, incluidos los planetas, sería la consecuencia de grandes masas de polvo y gases provenientes del estallido de alguna estrella cercana, una supernova, todo ese material entró en rotación para conservar la cantidad de movimiento angular. En torno al Sol, por desplazamiento de masa hacia la periferia, se habrían formado anillos de material que habrían ido condensando, por colisiones, hasta formar la Tierra y los otros planetas. Los otros hitos o umbrales, serían, de acuerdo a la Gran Historia: la formación de organismos vivos, el aprendizaje colectivo, la aparición de la agricultura y el surgimiento de la Sociedad Moderna.

Esta Gran Historia, no es la historia tradicional a la que estábamos habituados, esa que, según se nos enseñó, nació con la escritura y que sin lugar a dudas, es la historia contada por aquellos que tenían la riqueza, y en consecuencia, el poder para contarla. Tampoco la Gran Historia hubiese podido surgir antes, puesto que los datos que aporta, provienen de la Ciencia y la Tecnología que recién surge en el siglo XX: la estimación de la edad del Universo, del Sistema Solar, del origen de la vida; los procesos que permiten la creación de los elementos químicos y la composición química del Universo que podemos observar, son todos recientes. Y es también reciente, la tremenda intervención que el ser humano hace sobre este frágil entorno. Si llevásemos la edad del Universo a las 24 horas de un día, resulta que el Homo Sapiens aparecería sobre el planeta, al final del penúltimo segundo.

Para enlazar los umbrales entre sí, Fred Spier define el concepto de "régimen" (en lugar de sistemas; algo así como un régimen político o régimen de estudios); así es como se distinguen: Régimen del Cosmos, a partir del Big Bang; el Régimen de la Tierra, desde la formación del Sistema Solar; el Régimen de la vida, con la aparición de seres vivos; y el último, el Régimen de la humanidad... Desde la generación de organismos vivos, vemos que todos los umbrales que le siguen, tienen vínculo directo con el ser humano, porque a partir del aprendizaje colectivo es ahora la humanidad la gestora de complejidad... Los cerebros humanos son las estructuras más complejas que la naturaleza ha creado, en un proceso (¿de prueba y error?) que ha tardado millones de años, y ahora es la propia humanidad la gestora de una complejidad sin precedentes... y el problema, es que lo hace a pasos agigantados. En este punto, la Gran Historia retorna a su mensaje original: a mayor complejidad, mayor vulnerabilidad; nuestra y de nuestro entorno, por tanto, se hace indispensable, y urgente, la toma de consciencia de habitar este lugar pequeñito y privilegiado que es el planeta Tierra.

OTRAS LECTURAS

Claro, F. (2015). **A la sombra del asombro. El mundo visto por la Física**. Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile.

Gribbin, J. (2011). **Biografía del universo**. Barcelona, España: Drakontos Bolsillo.

Gribbin, J. (2011). **Historia de la Ciencia**. Barcelona, España: Crítica.

Green B. (2011). **La realidad oculta**. Barcelona, España: Crítica.

Hawking, S. (2010). **Brevísima historia del tiempo**. Barcelona, España: Crítica.

Hawking, S. (2011). **Historia del tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros**. Madrid, España: Alianza.

Hawking, S. (2002). **El universo en una cáscara de nuez**. Barcelona, España: Crítica.

Masa, J. M. (2017). **Somos polvo de estrellas**. Santiago, Chile: Planeta.

Ruiz, M. T. (2017). **Hijos de las estrellas**. Santiago, Chile: Penguin Random House.

Spier, F. (2010). **Big History and the future of Humanity**. Chichester, Inglaterra: Willey-Blackwell.

Susskind, L. (2009). **La Guerra de los agujeros negros**. Barcelona, España: Crítica.

Thorne, K. S. (2010). **Agujeros negros y tiempo curvo. El escandaloso legado de Einstein**. Barcelona, España: Crítica.

Tyson, N. (2018). **Astrofísica para gente apurada**. Santiago, Chile: Paidós.

Tyson, N; Goldsmith, D. (2018). **Orígenes, Catorce mil años de evolución cósmica**. Santiago, Chile: Paidós.

Weinberg, S. (2009). **Los tres primeros minutos del Universo**. Madrid, España: Alianza.

