

# ENTRE GALAXIAS Y ÁTOMOS. LA FÍSICA EN EL UNIVERSO

## Reportaje

a Guillermo Abramson

por Mónica de Torres Curth, Cecilia Fourés y Gustavo Viozzi

Desde la Patagonia charló con Guillermo Abramson que, con su enfoque accesible y apasionado, nos invita a descubrir la belleza del Universo a través de la física y a entender cómo las leyes fundamentales del Universo se manifiestan en fenómenos cotidianos.

**Desde La Patagonia (DLP):** Buenos días Guillermo. Es un gusto poder entrevistarte. Como pregunta inicial queríamos que nos cuentes cómo nació tu interés por la astronomía y por el Universo.

**Guillermo Abramson (GA):** A mí me atrajo la astronomía y el Universo desde muy chiquito. Como nos pasa a muchos de los que nos dedicamos a la ciencia, alrededor de los diez años surge la vocación por los fenómenos naturales. Uno cuando es niño no sabe qué es la astronomía, a mí me gustaban todos los fenómenos naturales. La astronomía en particular, sobre todo porque eran los años del Apolo y los viajes a la Luna, esas cosas estaban en los medios de comunicación. Inmediatamente después comenzaron los viajes de exploración del Sistema Solar con las Voyager y esperábamos ansiosamente las revistas del *National Geographic* que venían con fotos en colores de los planetas y sus satélites. Es increíble, pero hoy en día transmiten las exploraciones de los planetas en tiempo real, y los vemos en video de alta resolución. De todas las ciencias elegí estudiar física. Tuve buenos profesores de física en la secundaria que me orientaron bien. Probablemente estudié eso para ser astrofísico, pero después mi carrera tomó por otro lado por cuestiones de cómo son las dinámicas de las carreras. También porque en esa época, finales de los años '80 y principio de los '90, en el Instituto Balseiro no había posibilidad de hacer nada relacionado con la astronomía ni con la astrofísica. Me interesaban muchas cosas de distintas ciencias. Entonces me fui orientando hacia los temas más relacionados con un trabajo interdisciplinario: con la ecología y no con la astronomía. Pero, como siempre me interesó la astronomía, seguí indagando en distintas lecturas afines con ese campo científico. Cuando empecé a dedicarme a la divulgación de la ciencia, lo que veía era que, si daba una charla sobre mi trabajo en física sobre las dinámicas de poblaciones o las dinámicas de las epidemias, con suerte



Imagen: Gentileza G. Abramson.

Guillermo Abramson, científico y divulgador de las ciencias, es investigador del CONICET en el Instituto Balseiro, miembro de la División Física Estadística e Interdisciplinaria (FIESTIN) del Centro Atómico Bariloche y profesor de la Universidad Nacional de Cuyo. Estudia diversos fenómenos relacionados con la física de sistemas biológicos y es un experto en astronomía.

venían diez personas. En cambio, si daba una charla sobre el Universo o de cualquier cosa relacionada con eso, venían cien personas (risas). Entonces me fue quedando claro que debía contar sobre astronomía y no sobre epidemiología.

**DLP:** ¿Cuál es la diferencia entre la astronomía y la astrofísica?

**GA:** Hoy en día no hay una gran diferencia: la astrofísica es la explicación física de los fenómenos que se observan en la astronomía. Había más diferencia a fines del siglo XIX o a principios de siglo XX, cuando una buena parte de la astronomía era simplemente observar lo que pasaba en el cielo y registrarlo.

**DLP:** Las personas que se dedican a la astronomía o a la astrofísica ¿son físicos como es tu caso?

**La Nebulosa Cangrejo (a 6.500 años luz, en la constelación de Tauro) es el residuo de una explosión de supernova ocurrida en 1054, y observada por astrónomos chinos y japoneses. La violenta explosión marcó el final de la existencia de una estrella mucho más pesada que el Sol, y está esparciendo en el medio interestelar el material reciclado durante su vida, incluyendo muchos elementos pesados que integrarán la siguiente generación de estrellas y planetas. El color naranja en los filamentos es principalmente hidrógeno, mientras que el azul es oxígeno y el verde es azufre.**



Imagen: NASA, ESA, J. Hester y A. Loll (Arizona State University)

**GA:** No, hay astrónomos y en Argentina está la carrera de Astronomía, en La Plata, en Córdoba y también en San Juan, donde está el observatorio de la Universidad muy cerca del de CONICET. También, hay físicos que hacen sus doctorados en temas de astronomía o de cosmología. Hoy en día hay muchos temas que son muy fronterizos entre la física fundamental y la astronomía a gran escala del Universo.

**DLP:** ¿Cómo conocemos lo que conocemos del Universo cuando nuestro punto de referencia es la Tierra?

**GA:** Eso es extraordinario, porque lo que sabemos del Universo es muchísimo. No sólo sobre la estructura del Universo sino sobre los procesos físicos. Por ejemplo la vida de las estrellas: cómo se forman, por qué brillan, cuánto tiempo duran, cómo desaparecen, cómo mueren. La astrofísica es una ciencia que se desarrolló en buena medida a lo largo del siglo XX y es extraordinaria ya que el objeto de estudio de la astronomía es distinto del de otras ciencias porque no se pueden hacer experimentos. No se puede meter un termómetro para saber la temperatura de una estrella, no se puede tomar una muestra para analizarla en el laboratorio... Todo lo que sabemos sobre los fenómenos del Universo y sobre el Universo mismo lo sabemos, principalmente, abrumadoramente, a través de la luz que nos llega de ellos, la luz dicho en un sentido general de la radiación electromagnética. La radiación electromagnética se extiende más allá de lo que podemos ver, con longitudes de onda cortas y más largas, pero es todo luz. Es el mismo fenómeno: la radio que usamos para comunicarnos, el horno de microondas, la radiación infrarroja, la luz que vemos, la radiación ultravioleta que nos oscurece la piel, los rayos X que utilizan los sanatorios para ver qué hay adentro de nuestro cuer-

po y los rayos *gamma* que usan en la industria para ver lo que hay adentro de las piezas tecnológicas... Es todo lo mismo, es el mismo fenómeno: es luz. Y lo que sabemos del Universo, lo sabemos gracias a estudiar lo que pasa con la luz. Y en menor medida también sabemos lo que pasa en el Universo gracias a partículas de materia (no de luz) que "llueven" sobre la Tierra: son rayos cósmicos. El observatorio más grande de rayos cósmicos del mundo está en Argentina -no sé si lo sabían- en el sur de la provincia de Mendoza, en Malargüe, cerca de Las Leñas. Y desde hace menos tiempo, tenemos información también gracias a nuevos observatorios de radiación gravitacional (de ondas de gravedad, que tampoco son luz, sino algo distinto). Existen tres o cuatro observatorios en el mundo capaces de detectarlas. Es muy limitado lo que se puede hacer hoy en día con ellas, pero son un nuevo mensajero de los fenómenos astronómicos. La cuestión es que, solamente usando luz más la ciencia (la física fundamentalmente), podemos construir modelos científicos, es decir, ecuaciones matemáticas que nos explican cómo funcionan los fenómenos del Universo. Por ejemplo, las ecuaciones fundamentales, que nos dicen de qué están hechas y cómo funcionan las estrellas, tienen 100 años. Las publicó Eddington en 1924 y claro, a partir de las ecuaciones y del modelo matemático que formuló (que no era completo, por supuesto, como en cualquier ciencia) se fue construyendo de forma incremental e intergeneracional. Muchas cosas no se podían hacer porque las ecuaciones eran complicadas y recién se pudieron analizar con computadoras en la segunda mitad del siglo XX. Así que llevó todo el siglo XX entender estos procesos astrofísicos pero, aun así, muchos descubrimientos fueron extraordinarios. Por ejemplo, los astrónomos que



**El cúmulo de galaxias de Coma contiene más de 1.000 galaxias individuales, cada una de ellas con sus centenares de miles de millones de estrellas, planetas, lunas, cometas, etc. En 1933 el astrónomo Fritz Zwicky descubrió que las galaxias del grupo se movían demasiado rápido unas con respecto a las otras, indicando que había más materia que la visible en forma de estrellas. Fue la primera evidencia de la existencia de la misteriosa “materia oscura”.**

se pasan la vida mirando el cielo por el telescopio y sacando fotos del cielo, haciendo cálculos de cómo funcionan los fenómenos naturales, lograron explicar de dónde vienen los átomos de nuestro cuerpo, cuál es el origen de nuestros átomos, de qué estamos hechos, que es una pregunta milenaria, es una cuestión filosófica o religiosa. Para la tradición judeocristiana los seres humanos estamos hechos de barro insuflado por el aliento divino, y para otras civilizaciones como las de Mesoamérica, estamos hechos de maíz. O, por poner otro ejemplo, para la mitología de Tolkien estamos hechos de música. De qué estamos hechos no parecía una cuestión que pudiera tener una respuesta científica. Sin embargo, los astrónomos, descubrieron que todos los átomos venían de las estrellas, que habían sido forjados en los centros de las estrellas donde ocurren reacciones nucleares, y que solamente el hidrógeno que tenemos en las moléculas de nuestro cuerpo era primordial y venía del origen del Universo. Y todo el resto se había formado en generaciones de estrellas anteriores al Sol; que había estrellas que se sucedían en generaciones como los seres vivos en la superficie de la Tierra, y que la materia del Universo se reciclaba en estas generaciones sucesivas de estrellas y se iba enriqueciendo con ellas. Así, en algún momento, el Sol formó nuestro sistema solar con todos nuestros átomos -los átomos de la Tierra, los átomos del Sol y también nuestros propios átomos-, usando esos átomos que venían de estrellas anteriores. Muchas de ellas que habían explotado de forma de supernova, esas extraordinarias explosiones que son tan brillantes que se ven desde el otro lado del Universo. Por ejemplo, el hierro que está en la hemoglobina de nuestra sangre o en nuestras herramientas, viene de explosiones de supernovas. Existieron, vivieron sus vidas y explotaron antes de que existiera y se formara nuestro sistema solar.

**30 DLP:** Esos átomos que se formaron con las explosiones de estrellas, ¿existían antes?

**GA:** No, no existían antes, solamente el hidrógeno

es primordial. En el origen del Universo también se formó helio, y muy poquito litio. Pero no todo el helio que tenemos en la Tierra es primordial: una parte se formó en estrellas como el Sol, que convierte hidrógeno en helio -el de los globos de cumpleaños y que cuando lo respiramos nos hace hablar finito-. O sea, sólo los elementos más livianos de la tabla periódica son primordiales. Eso lo calculó un físico llamado George Gamow, un ruso extraordinario que fue un gran divulgador. De adolescente leí todos sus libros de divulgación.

**DLP:** Un libro que seguramente ningún otro adolescente leyó (risas).

**GA:** El primero que leí me lo prestó mi profesora de matemática de primer año de la escuela secundaria, cuando vio que me gustaba la matemática. Me dio “Uno, dos, tres, infinito”, y yo lo devoré y se lo devolví. Y ella se lo dio a otro de mis compañeros, Javier Fernández, y que ahora es profesor de matemática en el Instituto Balseiro. Inmediatamente quise leerlo de nuevo así que fui a la biblioteca del colegio, lo saqué y lo leí de nuevo. En la década del ‘30 -hace 100 años- Gamow calculó, en base a las ideas que habían tenido unos astrónomos y físicos contemporáneos suyos -y usando la Relatividad de Einstein que recién se había formulado- cómo tenía que haber sido el estado del Universo primordial, si el Universo se estuviera expandiendo como los astrónomos habían descubierto en la década del ‘20. Y ese cálculo le dio que, hace miles de millones de años, el Universo tenía que haber estado en un estado caliente, compacto, en el que ocurrían reacciones nucleares. Pudo calcular las tasas de reacciones nucleares y cómo tenía que haber sido ese proceso, y que, partiendo de la energía que existía en ese estado compacto, el Universo tendría que haberse formado en base a tanta proporción de hidrógeno, tanta proporción de helio y tanta proporción de litio. Él lo calculó y después de décadas se logró medir, y esa que Gamow propuso era exactamente la composición



**Este globo reproduce las observaciones del satélite Planck (ESA/Planck Collaboration), representando en una escala de colores las pequeñas fluctuaciones de temperatura que se observan en el Fondo Cósmico de Microondas, que vemos venir de todos lados del cielo. Estas fluctuaciones corresponden a distintas densidades de la materia caliente que llenaba el universo hace 13 mil millones de años, y que acabaron formando las galaxias, como la nuestra. Es la luz más antigua que podemos ver, y corresponde a un momento de la evolución del universo en el que se formaron todos los átomos de hidrógeno, incluyendo los dos átomos por cada molécula de agua que vemos en la nieve cubriendo los cerros de la cordillera de los Andes, al fondo.**



Imagen: G. Abramson.

del Universo. Porque sigue siendo así: el reciclado es mínimo. La cantidad de átomos de hidrógeno que se han convertido es muy pequeña, aunque a nosotros nos parece abundante porque tenemos un montón de otros átomos. Nuestro cuerpo está hecho de carbono, de calcio, de fósforo, de azufre, de nitrógeno pero, aunque esos elementos nos parecen abundantes, son escasos en el Universo. Los más abundantes son el hidrógeno y el helio, que es de lo que están hechas las estrellas.

**DLP:** Cuando la Tierra se formó ¿tenía la misma composición de átomos que tiene actualmente o fue adquiriendo nuevos?

**GA:** Sí, prácticamente tiene la misma composición. Lo más complicado de explicar -para lo cual no hay una respuesta definitiva todavía- es el origen del agua en nuestro planeta. O sea, si la Tierra se formó en este lugar donde está ahora, tendría que tener menos agua porque, como estamos en un lugar calentito del Sistema Solar, el agua se evapora. Los planetas que se formaron con agua (y otras sustancias de las llamadas "volátiles", como el anhídrido carbónico o el amoníaco) son los que lo hicieron en las regiones exteriores del Sistema Solar. Por ejemplo, las lunas de los planetas gigantes tienen mucha más agua que la Tierra, porque cuando se forman los planetas hay como una especie de destilación, o sea, los materiales más volátiles quedan afuera y los menos volátiles y más sólidos -los minerales con metales- quedan adentro, más cerca del Sol. Entonces la Tierra tendría que tener fundamentalmente metales y óxidos metálicos, pero tiene además mucha agua. Así que el agua vino después, pero no mucho después. No sabemos cuánto después, aunque igual fue hace mucho tiempo. No es que llegó hace cien millones de años. Ocurrió en los primeros 500 millones de años de existencia de la Tierra. Hay distintas explicaciones al respecto, por ejemplo, que vino con cometas, que fueron asteroides, que hubo migraciones en los planetas en esa época de consoli-

dación del Sistema Solar. Eso es algo que también es importante decir, porque en general la gente no se lo imagina: cuando decimos que algunas cosas no las sabemos, eso no quiere decir que no tengamos una respuesta. Casi siempre lo que ocurre es que tenemos muchas respuestas: cuando un científico te dice que no sabe, no significa que no sabe, significa que tiene muchas respuestas y no sabe cuál es la correcta. A veces pasan décadas hasta que se consolida un consenso con suficiente evidencia y tenemos una respuesta definitiva.

**DLP:** Esos fenómenos de formación de planetas, sistemas solares, etc. ¿siguen ocurriendo o fue algo que ocurrió al principio? Es raro hablar de "el principio" porque es difícil imaginar qué es, y consecuentemente, qué había antes.

**GA:** Bueno, más adelante hablaremos sobre el principio. Primero contesto sobre la formación de los sistemas solares, que es algo que sigue ocurriendo, y que también es algo extraordinario. Siempre supusimos que había otros mundos en el Universo, desde Giordano Bruno que dijo que existían otros planetas habitados en el Universo y por eso lo quemaron en el *Campo dei Fiori*. Cuando nosotros éramos chicos -en esa época- se suponía que existían otros planetas alrededor de otras estrellas, pero no se supo con certeza hasta que empezaron a descubrirlos, cosa que ocurrió recién hacia finales del siglo XX, en 1995. Hoy conocemos miles y miles de planetas que orbitan alrededor de otras estrellas, muchos de ellos formando parte de sistemas planetarios como el nuestro. Y no sólo conocemos miles de planetas, sino que también sistemas planetarios en formación, y lo que vemos en esos sistemas planetarios en formación confirma todo lo que los teóricos de la geología explicaron acerca de cómo se formó nuestro Sistema Solar. Que también fue una pregunta filosófica, hasta que Laplace hizo una conjetura de cómo había pasado. Hace 100 años, por ejemplo, competían dos hipótesis principales: una era



Imagen: Gentileza G. Abramson.

**El “desayuno cuántico” representa la idea de que, para entender cómo brillan los alambres de un tostador (o la superficie de una estrella), necesitamos la física cuántica. No es sólo la física de las partículas subatómicas: necesitamos la física cuántica para explicar y entender muchos fenómenos cotidianos, desde el brillo de un objeto caliente hasta el funcionamiento de los dispositivos electrónicos de la actual civilización tecnológica.**

que los planetas se formaban por condensación en un disco que existía alrededor de las estrellas en su etapa primordial, cuando no había terminado de colapsar gravitacionalmente la materia que terminaba formando la estrella. Otra de las hipótesis sostenía que había un disco y que inestabilidades en el disco producían los planetas. Otra más decía que una estrella pasaba adentro de otra y le arrancaba una pluma de material que se condensaba y formaba los planetas. Estas eran hipótesis científicas hace 100 años. Hoy en día sabemos que lo que verdaderamente ocurre es lo que postula la primera, o sea que cuando se forma una estrella, en los primeros cientos de millones de años existe a su alrededor un disco de materia a partir de la cual se forman los planetas. Esos discos se ven con radiotelescopio, se ven los planetas formándose a su alrededor y se miden sus propiedades. Así que la teoría sobre cómo se formaron los planetas seguramente va ocupar buena parte del siglo XXI, a medida que se observen más y más de estos sistemas en formación.

**DLP:** Estos planetas afuera de nuestro Sistema Solar, ¿son los que se denominan exoplanetas?

**GA:** Sí, les dicen exoplanetas. Pero no son otra cosa, son lo mismo que los planetas, son como la Tierra y Júpiter, sólo que están alrededor de otras estrellas. Hay algunos que están sueltos, sin estrellas. Esto ocurre porque muchas estrellas se forman en sistemas

múltiples y las órbitas de los objetos que existen en estos sistemas son caóticas, por lo que algunos pueden resultar expulsados y en ocasiones los planetas quedan flotando libremente. Esos se llaman *free floating planets*, planetas que flotan libremente, y también se han descubierto en las últimas décadas.

**DLP:** Cuando decís que flotan libremente, ¿quiere decir que están viajando a una velocidad altísima?

**GA:** Están en órbita en la galaxia, es decir, orbitan alrededor del centro de la galaxia, al igual que las estrellas (como el Sol y nosotros mismos). Las velocidades son relativas, o sea la velocidad es grande o pequeña según con respecto a qué, eso es algo que descubrió Galileo, no hay velocidades absolutas. Estos planetas se mueven a velocidades comparables a las de las estrellas que están en la misma región de la galaxia. Están en órbita y estar en órbita es estar en caída libre.

**DLP:** Explicanos un poco más este concepto de que estos planetas que están en órbita alrededor del centro de la galaxia “están en caída libre”.

**GA:** Estar en órbita es lo mismo que estar en caída libre. Esa fue la que Einstein llamó su “idea más feliz”, y fue para él la clave para poder formular la Teoría General de la Relatividad, que es la teoría de gravitación. Empezó a pensar en esto apenas terminó la Teoría Especial de Relatividad, en la cual se formula matemáticamente esta cuestión de que las velocidades son relativas y que hay una única velocidad absoluta que es la velocidad de la luz. Einstein inmediatamente se dio cuenta de que tenía que formular una nueva teoría, incorporando la gravedad en una Relatividad General. Empezó a hacerlo y no le salía. Entonces se le ocurrió esto, que llamó “su idea más feliz”, hoy se llama el Principio de Equivalencia. Se dio cuenta de que se podía “apagar” la gravedad ¿Cómo se hace para apagar la gravedad? Él imaginó saltar al vacío desde el techo de su casa y hacer experimentos de física mientras caía. Duraría un segundo la caída del techo hasta el piso (risas). Cuando hoy se explica esto en los cursos, uno se imagina un ascensor en caída libre, y uno va haciendo experimentos ahí adentro. Galileo descubrió -300 años antes de Einstein- que una bola pesada y una bola liviana caen con la misma aceleración desde la cima de la Torre de Pisa. Entonces, si repito este experimento dentro del ascensor mientras yo mismo estoy cayendo, suelto las bolas y quedan ahí flotando junto a mí porque ambas se aceleran hacia abajo con la misma aceleración que yo. Si estábamos relativamente quietos inicialmente -velocidad relativa cero- nos aceleramos con la misma aceleración y entonces quedamos quietos, “flotando”. Es exactamente lo mismo que ocurre cuando un astronauta está en órbita alrededor de la Tierra y tiene un pomelo y una naranja en la mano y abre las manos y la naranja y el



Imagen: Gentileza G. Abramson.

**Alguien registró las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein, que constituyen el objeto central de la Teoría de la Relatividad General, en una locomotora abandonada en el Salar de Uyuni, en el altiplano boliviano. Los trenes juegan un rol importante en los muchos "experimentos mentales" que ayudaron a Einstein a formular la teoría, y a innumerables estudiantes de física, a entenderla. El signo negativo en el miembro de la derecha corresponde a la convención de signos de Einstein y otros autores. La convención actual es distinta, y corresponde un signo positivo allí. Falta el término de la constante cosmológica,  $\Lambda g_{\mu\nu}$ , que Einstein puso, luego quitó, y ahora resulta que hay que volver a poner.**

pomelo quedan flotando junto a él. Estar en órbita es exactamente lo mismo que estar en caída libre.

**DLP:** ¿Esto sería gravedad cero?

**GA:** No, no es cero. Porque la aceleración de la gravedad donde están los satélites artificiales, a 400 kilómetros de altura, es casi la misma que en la superficie de la Tierra. Acá la aceleración de la gravedad es 9,8 metros por segundo al cuadrado, y en la Estación Espacial Internacional, a 400 km de altura, es 8,7 metros por segundo al cuadrado, la gravedad sigue estando y es casi igual.

**DLP:** Y si hay aceleración de la gravedad, ¿por qué ese satélite no se cae hacia la Tierra?

**GA:** No se cae hacia la Tierra, porque se está moviendo horizontalmente. Esa velocidad horizontal se la dio el cohete que lo puso en órbita. En el libro más extraordinario de la revolución científica del siglo XVII, "Principios Matemáticos de la Filosofía Natural", Newton hace el cálculo del tiro horizontal de una bala de cañón desde la cima de una montaña. Y muestra que, cuanto más rápida, más lejos llega, y que, si la velocidad horizontal es suficientemente grande, la bala de cañón quedará en órbita alrededor de la Tierra, regresando a la cima "desde atrás". Es así exactamente como se ponen en órbita los satélites artificiales: lo que hace el cohete es llevar al satélite artificial más arriba que una montaña (fuera del aire, por encima de los 100 kilómetros de altura, donde el aire es irrelevante) y al mismo tiempo darle una velocidad horizontal. Por eso se busca que los sitios de lanzamiento estén lo más cercanos posible al Ecuador para aprovechar la

velocidad que ya tienen por la rotación de la Tierra. Por eso los norteamericanos lanzan desde Florida, los europeos desde la Guayana Francesa. El sitio de lanzamiento en Argentina era en El Chamental, La Rioja. Cuanto más cerca del Ecuador estás, más aprovechás la velocidad horizontal.

**DLP:** Nos fuimos de tema (risas)... Volvamos del principio del Universo, a su expansión...

**GA:** Ustedes me preguntan si el *Big Bang* es una de las tantas hipótesis o si tiene algún grado de evidencia que permita pensar que fue así. Como les dije, Gamow fue uno de los padres del *Big Bang*. Él fue un físico teórico: hizo cálculos y dijo que el Universo tenía que haber sido así. En la década de 1920 los astrónomos observaron que el Universo se está expandiendo, y a partir de allí se llegó a un montón de conclusiones, conclusiones teóricas, resultado de cálculos. Todas esas conclusiones resultaron reales, es decir, resultaron observadas en experimentos sucesivos a lo largo de décadas hasta el día de hoy. La principal fue la primera que se observó: tenía que existir una radiación electromagnética viniendo de todo el Universo a una misma longitud de onda. Los astrónomos la midieron en temperatura, como si hubiera un calorito viniendo de todos lados del Universo a la vez, superpuesto a todos los puntitos de luz que son las estrellas y las galaxias. Sería el residuo de ese calor que había calculado Gamow, que debería haber existido cuando se formaron los átomos fundamentales de hidrógeno y helio iniciales del Universo. Gamow calculó esto en la década de 1930, y llevó 30 años hasta que, en la década de 1960, se observó por primera vez -de ma-



nera precaria- esa radiación, que está en la longitud de onda de las microondas, una de las luces no visibles. En sucesivos experimentos se las fue observando en mayor detalle y hoy son la mejor evidencia del *Big Bang*. La estructura que tienen estas ondas, las pequeñas fluctuaciones de temperatura, la longitud de onda que viene desde distintas partes del cielo, son la mejor evidencia de que la idea del origen del Universo como un objeto compacto y caliente (súper caliente), es cierta. Por supuesto, a mediados del siglo XX había hipótesis que competían, como comenté antes, pero la única verdad es la realidad. Cuando se evidencian las consecuencias de la hipótesis que resulta ser cierta, esa es la hipótesis que se refuerza, así que hoy no tenemos dudas de que el Universo es así. Vale la pena decir que, a pesar de su nombre y como se los suele representar -mal- en los documentales de *Discovery Channel*, como una explosión con Neil de Grasse de traje, de espaldas a contra luz y una explosión que ocurre detrás de él, eso no es el *Big Bang*. El *Big Bang* no es una explosión, el *Big Bang* es el Universo en expansión, y en algún sentido sigue ocurriendo: es la evolución del Universo en expansión. Ahora, en ese fondo cósmico de microondas, ¿qué son estas microondas? Son lo mismo que la luz. Las microondas están hechas de fotones: esa luz que viene del Universo son fotones. Esos fotones -que en 1965 fueron detectados por primera vez con una antena, y hoy en día se los ve con radio telescopios tanto en la superficie de la Tierra como en órbita- son realmente fósiles del origen del Universo. Así que lo que sabemos del origen del Universo es gracias a la luz que nos llega, en este caso en forma de microondas, luz que viene de esa etapa primordial del Universo, cuando era muy distinto de lo que es ahora: no había átomos pesados, no había estrellas, no había planetas, no había galaxias, lo único que había era una bola de hidrógeno y fotones calientes. Eso por supuesto, no podemos verlo... bueno sí, podemos verlo, porque esos fotones siguen viajando por el Universo.

**DLP:** Y respecto de la discusión sobre si el Universo es finito o infinito, ¿qué evidencias hay?

**GA:** En general, cuando decimos "Universo", cuando los astrónomos dicen "Universo", cuando los cosmólogos dicen "Universo", y también cuando la gente dice "Universo", nos referimos al Universo visible. Porque, como el Universo tiene una edad y la velocidad de la luz es finita, si hay estrellas que están más lejos que el tiempo que necesita la luz de esas estrellas para llegar a la Tierra, a esas estrellas no las podemos ver. Ese Universo visible, es finito.

**34 DLP:** Decís que el Universo tiene una edad...

**GA:** El Universo tiene una edad que se puede calcu-

lar. Nadie la puede medir con un reloj, pero se la puede calcular con modelos físicos a partir de las mínimas diferencias (menos de una parte en 10.000) que hay en esta radiación que viene de atrás de las estrellas, desde distintas partes del cielo.

Hay un horizonte (así se llama: horizonte, como el del mar) que determina el Universo que podemos ver, vemos hasta donde está el horizonte. En el Universo medimos las distancias en años luz, que es casi lo mismo que medirlas en tiempo, esto gracias a que la velocidad de la luz es finita, fija, universal, la misma en todos lados. La edad del Universo, calculada a partir de esto, es de 13 mil millones de años. Es apenas tres veces más antiguo que el Sistema Solar. Si hubiera estrellas a una distancia mayor que la de este horizonte, habrían mandado sus fotones en nuestra dirección, pero todavía no han llegado a la Tierra. El primero que dio la explicación correcta de esto fue Edgar Allan Poe, que explicó esto en una novela en el siglo XIX. Poe dijo que la noche es oscura porque la luz de estrellas más lejanas no ha tenido tiempo de llegarnos. De lo contrario, si el Universo fuera infinito e infinitamente antiguo, cada punto del cielo debería ser brillante, y el cielo nocturno no se vería oscuro. Así que, sorprendentemente, llegó a la conclusión de un Universo dinámico, mucho antes de la evidencia científica. Pero volviendo a la edad del Universo, sabemos que son más de 13 mil millones de años, pero como el Universo se está expandiendo todo el tiempo, resulta que el horizonte está hoy en día a 46 mil millones de años luz. Es decir, la luz viajó 13 mil millones de años, pero el lugar de donde partió, hoy está a 46 mil millones de años luz de nosotros porque durante todo ese tiempo el Universo se expandió. Ese es el radio del Universo observable. ¿Qué hay más allá del Universo, del horizonte del Universo observable? Hay más Universo, igual al nuestro, sólo que no podemos verlo.

**DLP:** Y ahí viene la pregunta si es finito o infinito.

**GA:** ¡Claro! Si agarramos una de esas estrellas que está a 40 mil millones años luz de nosotros y dibujamos el horizonte de su propio Universo observable, habrá otra esfera de 46 mil millones de años luz alrededor de esa estrella, y entre el borde de nuestra esfera y el borde lejano de la otra esfera hay más de 100 mil millones de años luz. ¿Cuántas de estas esferas podríamos encadenar? A partir de algo técnico que se llama la curvatura del espacio -que también se mide- se puede calcular que más allá de nuestros 46 mil millones de años luz hay por lo menos cien veces más; es decir, el Universo es mucho más grande de lo que podemos ver. ¿Qué hay más allá? lo mismo que acá, no hay otra cosa, no es distinto, la tabla periódica es la misma. Si hay gente, habrá gente parecida a nosotros, si hacen whisky tendrá el mismo sabor que

tiene el whisky que tomamos nosotros. Es el Universo, simplemente no podemos verlo, y es cien, doscientas, trecientas veces más grande que el que podemos ver. Ahora, cien, doscientas, trecientas veces más grande todavía sigue sin ser infinito. Pero si fuera finito, tendría que haber consecuencias, porque hay dos posibilidades: que tenga un borde o que no tenga un borde. Si tiene un borde hay algo que está del otro lado del borde, así que no puede tener un borde. Y si no tiene un borde, siendo finito, debería tener una topología no trivial (que hace que no tenga borde) y eso haría que los fotones que viajan por el Universo tengan trayectorias no triviales, o sea, no sean sólo geodésicas que se pierden en el infinito. Una de las posibilidades es que se cierre sobre sí mismo y que esos fotones puedan volver y repetir sus trayectorias una y otra vez... Entonces tendríamos que ver estructuras repetidas, como en un laberinto de espejos. Pero las han buscado y no las han encontrado, ¿están o no están? No lo sabemos. ¿Qué topología tiene? Sabemos que es "localmente plano", así que no puede ser como una esfera; pero hay topologías no triviales que son planas, por ejemplo, un toroide es localmente plano. ¿Será como un toroide, como una rosquilla de Homero Simpson? ¿Cómo va a tener un agujero el Universo? Bueno, no sé.

**DLP:** Es impactante que digas que no es esférico, pensé que dábamos por sentado que era esférico.

**GA:** No, no. El Universo no es esférico; lo que es esférico es el Universo visible, este horizonte es esférico. Pero volvamos a la finitud o infinitud... Vimos que si es finito hay complicaciones y no nos decidimos. ¿Y cómo va a ser infinito? Se necesita bastante energía para crearlo, infinita energía. Cualquier proceso físico tiene energía finita. Sin embargo, las dos opciones son posibles, son compatibles con los modelos matemáticos actuales, es decir con lo que sabemos de la Relatividad General y de la mecánica cuántica.

**DLP:** Es ahí donde hay algunas contradicciones en las cuentas, ¿no?

**GA:** Si. Inclusive podría ser infinito o finito en el tiempo también, o sea, podría tener un origen hace 13 mil millones de años o puede ser que hace 13 mil millones de años haya estado en este estado, que vino de un estado anterior, tal vez infinitamente antiguo. Las dos cosas son posibles. Y es curioso esto de la finitud y de la eternidad, porque a lo largo de la historia de la ciencia, la cuestión de si el Universo es finito o si es eterno se ha ido alternando. Algunas religiones y algunas filosofías han dado respuestas: que es finito, que es infinito, que hay un momento de creación, pero que antes de la creación había otro estado... Estas cosas finalmente terminaron convirtiéndose, en el siglo

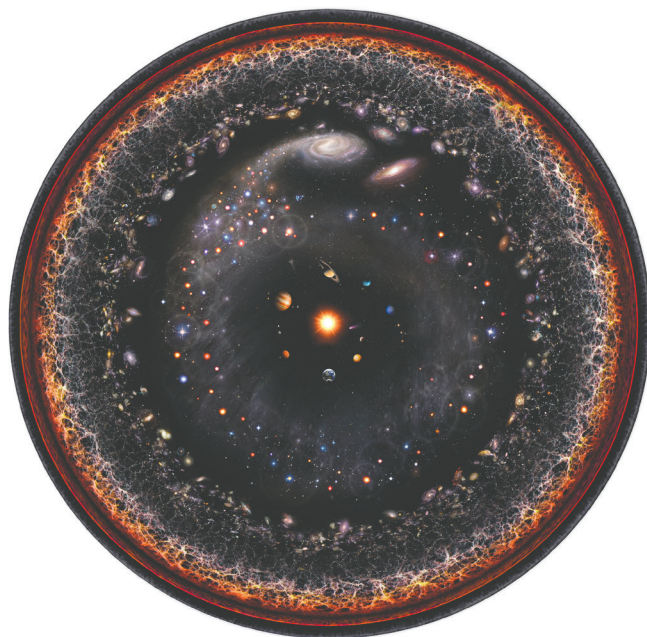


Imagen: P. C. Budassi CC BY-SA

**Ilustración del universo observable con el Sistema Solar en el centro, los planetas, Alfa Centauri y otras estrellas cercanas, un brazo galáctico y la Vía Láctea, Andrómeda y las galaxias cercanas, la telaraña cósmica de cúmulos galácticos, la radiación de fondo de microondas y el Big Bang en el borde. Una escala logarítmica en la dirección radial permite visualizar todos estos componentes, que se encuentran a una enorme diversidad de distancias, en una única imagen.**

XX y el XXI, en cuestiones que estamos sometiendo al proceso científico, que es el de calcular con la ciencia que conocemos que funciona y medir. La física es una ciencia natural y la respuesta -que aún no tenemos- no va a venir de la belleza de la matemática, va a venir de las mediciones.

**DLP:** ¿Cómo aparecen acá los conceptos de la materia oscura, la energía oscura, los agujeros negros, los agujeros de gusano?

**GA:** Como consecuencia de la teoría y las observaciones resultó la pregunta, ¿de qué está hecho el Universo a gran escala?

**DLP:** ¿De nada?

**GA:** El Universo está hecho de casi nada, claro. Pero no es simplemente una caja de zapatos adentro de la cual ocurren cosas. Es un objeto y por eso hay ondas que se propagan. Está hecho de espacio-tiempo, y de materia y radiación. Mucha más radiación que materia. Hay miles de millones de veces más fotones (las partículas de radiación) que partículas de materia en el Universo. Pero a mediados de siglo XX empezó a aparecer cierta evidencia de que la cantidad de materia que había no era suficiente para explicar las trayectorias de las estrellas alrededor de las galaxias. O de las galaxias cuando se mueven en conjunto en lo



que se llaman cúmulos de galaxias. Parecía que había más interacción gravitatoria que lo que la materia visible permitía concluir. Y la evidencia de la existencia de esta materia invisible se fue sumando a lo largo de décadas hasta el principio del siglo XXI y, como es una materia que no podemos ver, la llamaron materia oscura: no sabemos de qué está hecha y hay muchas conjeturas. A esto se aplica lo que dije antes: que no sabemos no significa que no tengamos respuestas, tenemos muchas respuestas, lo que no sabemos es cuál es la correcta. Hay muchas teorías matemáticas y físicas, es decir, con ecuaciones, que explican qué es esta materia oscura, pero la cuestión, de nuevo, la va a zanjar la observación. Ya se han descartado un montón de candidatos, como por ejemplo que podrían ser planetas, que no brillan o que podrían ser agujeros negros, que no brillan..., así que debe ser otra cosa. Lo que se cree hoy en día -se llama "materia oscura fría"- es que son partículas, como las partículas que forman los átomos, pero de un tipo que no está en el modelo físico que explica la materia que forman los átomos, que se llama "Modelo Estándar de Partículas y Campos". Que ya sabemos que es limitado, o sea que no habría problema en incorporar más cosas. Nadie se rasga las vestiduras por eso, y entonces hay físicos experimentales, hay proyectos de laboratorio donde se está tratando de medir las partículas de materia oscura, por ahora sin éxito. Inclusive físicos del Centro Atómico tienen proyectos para medirla y están haciendo experimentos en las minas de Sierra Grande, por ejemplo. Ojalá la descubran ellos y les den el Premio Nobel (risas). Así que eso es la materia oscura: sería materia o tal vez sea otra cosa, todavía no tenemos evidencia. Como todavía no tenemos evidencia, tal vez sea otra cosa, tal vez haya algo mal en las ecuaciones de la gravedad... no sabemos. También sabemos que la Relatividad General es limitada, habrá que modificarla en algún momento, así que tal vez hay que hacer una modificación que permita que este fenómeno observado, que adjudicamos a la materia oscura, sea el resultado de una nueva física. Hoy por hoy, lo que parece ocurrir es que debería haber unas partículas, que son difíciles de detectar por naturaleza -porque si no ya las hubiéramos detectado- y que serían parte de la materia del Universo. La energía oscura es un bicho completamente distinto. La energía oscura ya está en las ecuaciones de Einstein como una magnitud, una variable en las ecuaciones del campo gravitatorio. Se llama "constante cosmológica". Durante décadas se creyó que valía cero, incluso Einstein dijo que había que sacarla y después resultó que había que ponerla. En el pasado el Universo era distinto de como es ahora, y en un pasado muy lejano era muy distinto, porque estaba toda la materia tan apretada que no podían ni existir los átomos. Esa expansión del Univer-

so se mide con un parámetro que se llama "constante de Hubble", porque Hubble fue el que descubrió que el Universo se estaba expandiendo. Aquí tengo un cuadro de Pablo Bernasconi, en el que hay una chica que está mirando un cielo oscuro y abajo está la ecuación que define el parámetro de Hubble: "velocidad igual a distancia por  $H_0$ "; es una de las ilustraciones de su libro "El infinito". Dice Bernasconi: "el infinito es la noche más estrellada de todas y nadie la ve porque está nublado", lo cual se aplica muy bien al intento de hacer astronomía en Bariloche (risas). Así que la energía oscura es algo distinto, no es algo material, es algo matemático que está en las ecuaciones. ¿Qué naturaleza tiene? No tiene una explicación más allá de la matemática, es algo que está en las ecuaciones de la Relatividad General, da cuenta del balance de materia y energía, porque, aunque no sea materia es energía y la materia y la energía son equivalentes en la Relatividad y hay que tenerlo en cuenta para hacer los cálculos usando estos datos.

**DLP:** ¿A qué velocidad se expande el Universo?

**GA:** ¿Escucharon hablar del telescopio espacial de Hubble? El telescopio espacial se llama así porque su misión era medir la constante de Hubble. Según el cálculo obtenido con este telescopio, que es muy técnico, el espacio se dilata a 74 kilómetros por segundo por megaparsec (un megaparsec equivale a 3.26 millones de años luz).

**DLP:** ¿Eso es lento o rápido?

**GA:** Y, ...74 kilómetros por segundo es una velocidad rápida inclusive en términos astronómicos. Significa que dos galaxias que se encuentren a 1 megaparsec una de la otra, se alejan a 74 km/s.

**DLP:** Si el Universo se expande, ¿por qué no vemos la expansión en la vida cotidiana?

**GA:** Esa pregunta es buenísima, y es tan natural que se le ocurrió Woody Allen: si el Universo se expande por qué es tan difícil encontrar lugar para estacionar (risas). Aquí hay que hacer una aclaración, porque realmente no se aplica a la superficie de la Tierra. No se aplica siquiera a la distancia entre las galaxias que nos rodean. El Universo se expande a gran escala, es decir, todo el Universo se expande, pero localmente existen otras fuerzas como la fuerza electromagnética, las fuerzas nucleares, la fuerza fuerte que es la que mantiene unidos a los protones y a los neutrones dentro de los núcleos atómicos... O sea, la expansión del Universo no evita que la galaxia de Andrómeda se esté acercando a la Vía Láctea. No todas las galaxias se alejan entre sí. Porque existe la gravedad, claro, van a chocar, y en un futuro van a fusionarse. La expansión del Universo tiene que ver solamente con el Universo

en su conjunto y a gran escala. A pequeña escala, no solamente existen otras fuerzas, sino que la gravedad es una fuerza atractiva. Entonces, ¿cómo se mide la expansión del Universo? Se mide con una de las variables de las ecuaciones de campo, o un parámetro que se puede definir a partir de ellas, que se llama el "factor de escala" del Universo a gran escala, que caracteriza si el espacio-tiempo (que representa el espacio y el tiempo convertidos en un objeto matemático) se está agrandando o se está achicando. El espacio-tiempo se achica, por ejemplo, porque la gravedad es atractiva. ¿Qué pasa en los agujeros negros? En la proximidad de los agujeros negros el espacio-tiempo no se está expandiendo, se está contrayendo. Sin embargo, a gran escala, mirando con los ojos entrecerrados para ignorar las inhomogeneidades locales (las estrellas, los agujeros negros, incluso las galaxias), veríamos el Universo como si fuera un fluido de materia y energía que sólo obedece a las ecuaciones de Einstein, y que se está expandiendo. Claro que el Universo es muy heterogéneo, y lo más interesante está muy concentrado donde las densidades son grandes, no donde hay un átomo por metro cúbico. Pero esas partecitas (nosotros, por ejemplo) no son la mayor parte del balance de energía del Universo.

**DLP:** Las leyes que gobiernan el funcionamiento de los átomos, ¿son las mismas que las que se aplican al funcionamiento del Universo?

**GA:** La mecánica cuántica es la misma: la teoría cuántica de campos. Es la misma y esto lo sabemos porque los fenómenos que observamos en lugares remotos del Universo, son describibles a partir de esas mismas leyes físicas de los experimentos de laboratorio. El mundo cuántico es difícil de imaginar, porque nuestra intuición de la vida cotidiana está desarrollada con fenómenos que son distintos, que son deterministas. Esta falla de nuestra intuición a partir del movimiento de los objetos en la vida cotidiana para coincidir con los fenómenos de la cuántica, hace que a menudo se dé una explicación de la mecánica cuántica que no es del todo correcta. Uno tiende a decir -la gente que lo escucha lo repite- que la mecánica cuántica "describe el comportamiento de los objetos más chiquitos que existen: los electrones, los átomos, las relaciones entre las moléculas, etc.". Eso es cierto, pero no es todo lo que es, por ejemplo, di una charla en el Planetario de Buenos Aires que se llamó "El desayuno cuántico", en la que mostraba los alambres del tostador con el cual preparo las tostadas en mi casa. Uno mira esos alambres y brillan. ¿Por qué brillan? Porque están calientes; es algo de lo más natural, un objeto caliente, cualquier objeto caliente, brilla: los alambres del tostador, el Sol, los carbones del asado... Un objeto caliente brilla. Cuando uno quiere describir físicamente cómo



Imagen: Gentileza P. Bernasconi.

**Pablo Bernasconi eligió la Ley de Hubble para una de las viñetas de su libro El infinito (Penguin Random House 2018). Está expresada de la manera ingenua que se usó al principio, como una velocidad de alejamiento, de las galaxias ( $v$ ) que se encuentran a distancia  $\Delta$ :  $v = H_0 \Delta$ . La constante de proporcionalidad,  $H_0$ , se llama constante (o parámetro) de Hubble. Cien años después de Hubble, esta relación está incorporada en un modelo mucho más complicado, que describe en términos de la Relatividad General, cómo se expande el universo.**

está brillando cualquier objeto caliente se encuentra con que la explicación es cuántica, de hecho, fue la primera explicación cuántica. La hizo Max Planck en 1899: la radiación del cuerpo negro, que explica por qué brilla el alambre del tostador y por qué brilla del color que brilla y no me calcinan con rayos ultravioletas de los carbones del asado cuando los prendo el domingo, esa explicación es cuántica, así que necesitamos la física cuántica inclusive para los fenómenos de la vida cotidiana, punto final (risas).

**DLP:** Te invitamos a que cierres esta entrevista como quieras.

**GA:** Lo último fue un buen cierre, ¡Gracias!

**DLP:** Gracias a vos, ¡fue un placer!