

## La naturaleza de la materia y la energía oscuras sigue siendo un enigma.

**A principios del siglo XIX** la astronomía entró en crisis. Urano, a la sazón el planeta más lejano que se conocía, no seguía de manera exacta, en su órbita, las predicciones matemáticas de los astrónomos. ¿Sería que la atracción gravitacional de un planeta desconocido y más lejano estaba afectando su movimiento?

Como la fuerza de gravedad es proporcional a la cantidad de masa del cuerpo que la produce, en nuestro Sistema Solar el que domina es el Sol, con 99.8% de la masa total del sistema. El Sol permanece casi inmóvil en el centro del Sistema Solar mientras que los planetas orbitan obedientemente a su alrededor; no en vano le llaman el “astro rey”.

Pero los planetas también se afectan gravitacionalmente entre sí, aunque menos que el Sol. Las desviaciones que se observa-

ban en la órbita de Urano podían explicarse por la presencia de un octavo planeta que le daba tironcitos gravitacionales al séptimo. Más aún: a partir de las anomalías de Urano se podía predecir la posición del planeta hipotético. El octavo planeta, Neptuno, fue observado por primera vez en 1843, en una posición celeste muy cercana a la que predecían los cálculos del astrónomo francés Urbain Le Verrier. La crisis de la órbita de Urano no sólo tuvo feliz solución, sino que consolidó la astronomía como una ciencia que podía predecir la existencia de cuerpos que nadie había visto directamente.

Se sabe que varios astrónomos habían visto Neptuno por sus telescopios sin reconocerlo como planeta del Sistema Solar. En particular, en los dibujos de Júpiter y su entorno que hizo Galileo Galilei a fines de 1612 y



Foto: cortesía NASA

**La existencia de Neptuno fue predicha teóricamente por las desviaciones que se observaban en la órbita de Urano. Estas desviaciones son producidas por la fuerza de gravedad de Neptuno actuando sobre Urano.**



principios de 1613 aparece un punto de luz que era Neptuno sin que Galileo lo supiera.

### Los planetas exosolares

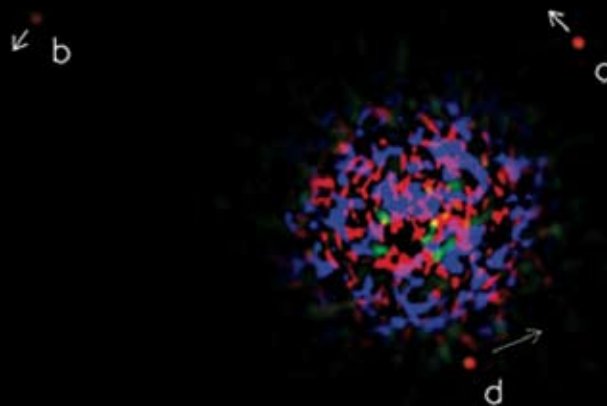
En nuestros tiempos se está desarrollando otra historia de cuerpos cósmicos cuya existencia se aceptó antes de detectarlos con certeza. Por lo menos desde el siglo XVII ha habido quien sospechaba que las otras estrellas podían tener planetas, como el Sol, pero fue hasta 1995 cuando se descubrió el primer ejemplo de planeta de otra estrella. El planeta que gira alrededor de 51 Pegaso no se detectó de manera directa, sino a partir de las irregularidades del desplazamiento de la estrella. Ésta se bambolea, completando un ciclo en 4.2 días. El bamboleo es muy pequeño, pero detectable. La explicación más viable es que 51 Pegaso está acompañada de un planeta similar en tamaño a Júpiter, el cual altera su movimiento.

En la actualidad inferimos la existencia de más de 300 planetas cuyas estrellas presentan estos bamboleos. Sin embargo, era inquietante que hasta hace poco nadie hubiera podido detectar directamente estos

planetas *exosolares* (o externos al Sistema Solar). Las cosas mejoraron un poco cuando se encontró que las órbitas de algunos de estos planetas están orientadas de tal manera que el planeta, en cada vuelta, se interpone entre nosotros y la estrella. Al pasar frente a la estrella, el planeta obstruye su luz (se produce una especie de eclipse parcial que tapa alrededor de 1% de la luz de la estrella). A estos pasos del planeta frente a su estrella se les conoce como *tránsitos*, y se repiten con la exactitud de un reloj. Los tránsitos son otra manera de detectar planetas exosolares, porque se puede medir la intensidad de la luz que nos llega de la estrella e identificar

sus disminuciones periódicas. ¿Aceptarían ustedes estos tránsitos como detección directa? ¿Es lo mismo ver un cuerpo por su luz que inferirlo por la ausencia de luz que puede ocasionar, es decir, por su sombra?

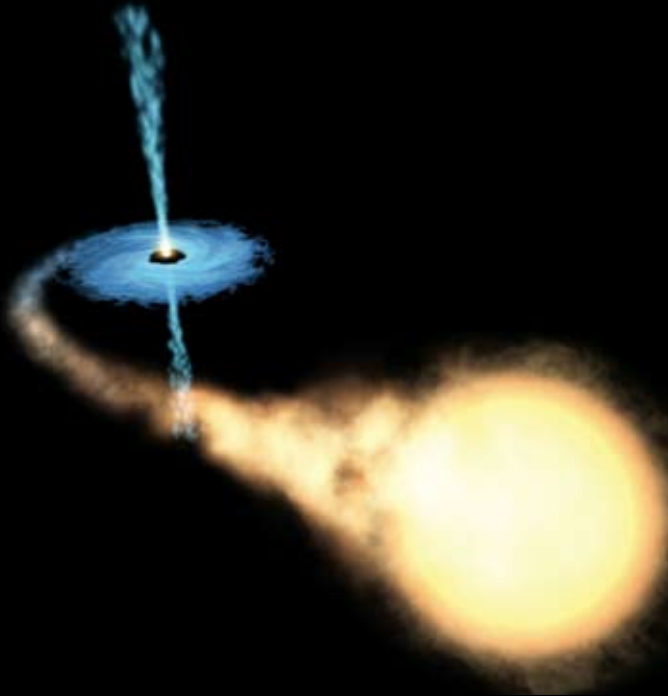
Quizá no tengamos que angustiarnos ya con esta decisión, porque recientemente unos cuantos equipos de investigadores han publicado las que podrían ser las primeras imágenes directas de planetas girando alrededor de otras estrellas. El caso más espectacular es el de la estrella HR 8799. La imagen, obtenida en ondas infrarrojas con un potente telescopio ubicado en Hawai, muestra no uno, ¡sino tres posibles planetas!



La estrella HR 8799 en ondas infrarrojas. El manchón al centro es la imagen de la estrella, artificialmente atenuada. Los puntos marcados como b, c, y d indican la posición de cuerpos mucho menos luminosos que se cree podrían ser planetas alrededor de esta estrella. Las flechas indican los desplazamientos observados en cuatro años. HR 8799 es una estrella parecida al Sol y se encuentra a 130 años-luz de la Tierra.

Imagen: cortesía Observatorio Keck

Luis Felipe Rodríguez



**Ilustración de cómo se cree que son los sistemas binarios de rayos X. Gas de la estrella normal (inf. derecha) es arrancado por la gravedad del hoyo negro (sup. izquierda). El gas no cae directamente al hoyo negro, sino que forma un disco que se calienta y emite rayos X. Al mismo tiempo se producen dos delgados chorros de gas (líneas casi verticales) que salen de las cercanías del hoyo negro.**

Sin embargo, otros astrónomos ponen en duda que estos puntitos de luz sean planetas y sugieren que se trata de *enanas marrones*, objetos que pueden clasificarse como ubicados entre las estrellas y los planetas. Las enanas marrones tienen masas de entre 10 y 80 veces la de Júpiter. Son tan grandes, que en su interior se producen reacciones de fusión nuclear parecidas a las que ocurren en el interior de las estrellas. Pero en las enanas marrones se fusiona deuterio, sustancia muy escasa, en vez de hidrógeno, elemento muy abundante que es el combustible nuclear de las estrellas de verdad.

### Los hoyos negros

Estamos cerca de poder fotografiar planetas exosolares con toda certeza, pero para otros objetos celestes, la posibilidad de obtener imágenes se ve aún remota.

Los hoyos negros tienen una fuerza de gravedad tan intensa que ni siquiera la luz alcanza a salir de ellos. Por definición, son oscuros.

No es que el hoyo negro, al formarse, genere gravedad adicional, sino que toda la masa de la estrella original queda comprimida en una región pequeña. Como la fuerza de gravedad es mayor cuanto más cerca esté uno del objeto que la produce, en la superficie de un objeto muy comprimido la gravedad es muy intensa. Si una estrella se

transforma en hoyo negro, los planetas que la rodean seguirían en sus mismas órbitas; es sólo muy cerca del hoyo negro donde ocurren efectos extremos.

El físico inglés Stephen Hawking alegó en 1974 que los hoyos negros no son totalmente negros, sino que emiten cierto tipo de radiación, por lo menos en teoría. La emisión hipotética se conoce como *radiación de Hawking*. Pero, si existe, es demasiado débil para detectarse en la práctica. Afortunadamente, hay hoyos negros que están acompañados de una estrella normal. Estudiando el movimiento de ésta se puede obtener información acerca del hoyo negro, en particular se puede determinar su masa. Nuestra galaxia tiene cientos de miles de millones de estrellas “normales” y un número desconocido de hoyos negros que se produjeron como resultado final de la evolución de las estrellas de masa muy alta (alrededor de 10 veces la masa del Sol). No podemos ver directamente los hoyos negros, pero sus efectos en la estrella que los acompaña (cuando es éste el caso) son tan dramáticos y característicos, que la mayoría de los astrónomos aceptan que existen.

En ciertas condiciones el hoyo negro arrebató gas de las partes externas de la estrella compañera y con este material se forma un disco alrededor del hoyo negro. Al girar, el gas se calienta por fricción. Su tem-

peratura aumenta tanto, que emite rayos X. Además, de las inmediaciones del hoyo negro salen gases expulsados en dos chorros opuestos. El astrofísico Riccardo Giacconi recibió parte del Premio Nobel de Física 2002 por descubrir objetos emisores de rayos X con estas características. Los astrónomos piensan que estas fuentes de rayos X contienen hoyos negros.

Además de estos hoyos negros que quedaron como remanente de la muerte de una estrella de gran masa, se cree que, en los centros de la mayoría de las galaxias (incluida la nuestra), existen gigantescos hoyos negros con masas que pueden llegar a miles de millones de veces la masa del Sol. No hay consenso sobre cómo se formaron, pero la espectacular influencia que tienen en su entorno ha convencido a la mayoría de los astrónomos de que sí existen. En el centro de la Vía Láctea hay un hoyo negro que domina los movimientos orbitales de las estrellas cercanas. A partir de estos movimientos se infiere que el hoyo negro tiene una masa de unos tres millones de veces la del Sol. Este hoyo negro, relativamente cercano, se podría detectar por medio de observaciones astronómicas de las ondas de radio que emite el gas caliente que lo rodea. La gravedad del hoyo negro debería desviar estas ondas y producir una “sombra” observable desde aquí. Como en el caso del tránsito de los exoplanetas, esta sombra sería una prueba más directa y convincente.

### La materia oscura

El Sol es una de los 100 000 millones de estrellas que forman nuestra galaxia. Todas estas estrellas se atraen entre sí. De hecho, así como los planetas giran alrededor del



Sol, a su vez el Sol y las otras estrellas están en órbitas más o menos circulares alrededor del centro de nuestra galaxia, donde se encuentra el hoyo negro que mencionamos arriba. Es importante señalar que la masa del hoyo negro, aunque muy grande comparada con la del Sol, es despreciable cuando la comparamos con la masa total de la galaxia (100 000 millones de masas solares). El movimiento de las estrellas a escala galáctica está determinado por la masa global de la galaxia y no por el hoyo negro central.

El Sol tarda 225 millones de años en dar una vuelta alrededor del centro de nuestra galaxia. Otras estrellas tienen periodos distintos. El estudio de los movimientos

de las estrellas de nuestra galaxia, así como de otras galaxias, muestra que las estrellas se mueven más rápido de lo que deberían si sólo las atrae la masa visible de sus galaxias. Al parecer, hay algo más que contribuye con su fuerza de gravedad a modificar el movimiento de las estrellas de una galaxia, pero que no se ve. Lo mismo pasa en la escala mucho mayor de los cúmulos de galaxias, que son regiones del espacio donde hay muchas galaxias muy juntas. Las velocidades de estas galaxias son también más grandes de lo esperado, lo que indica la presencia de una fuente extra de gravedad. Estudiando estos cúmulos de galaxias fue como el astrónomo Fritz Zwicky argumentó por vez primera, a mediados del siglo pasado, que en el espacio había “materia oscura”, que ejerce atracción gravitacional pero no emite luz.

Al principio, estos descubrimientos no preocuparon a los astrónomos. Después de todo, se sabía que hay estrellas apagadas y hoyos negros que no emiten luz, pero sí ejercen atracción gravitacional. No detectaríamos directamente estos cuerpos, pero sabemos de qué están hechos y en el fondo no serían un gran misterio. Pero los astrónomos tenemos manera de calcular cuántos de estos cuerpos oscuros hechos de materia “normal” hay en el Universo y nos

sale que no son ni remotamente suficientes para explicar la fuerza de gravedad que se observa a grandes escalas.

Estas ideas se han comprobado con los estudios de la radiación cósmica de fondo, radiación que nos llega de todas direcciones y que se generó cuando el Universo tenía sólo 300 000 años de edad (hoy se calcula la antigüedad del Universo en 13 700 millones de años). Estos estudios permiten concluir con confianza que la materia “normal” es sólo alrededor del 15% de la materia total que hay en el Universo. ¿De qué está hecho el 85% restante?

Se especula que este 85% faltante posiblemente está formado por unas partículas que tienen masa, pero que no producen ni absorben luz, y que casi no interactúan con la materia normal. Los físicos teóricos las llaman WIMP, por las iniciales en inglés del término “partículas masivas que interactúan débilmente”. Se cree que, mientras la materia convencional forma grumos, como galaxias y cúmulos de galaxias, la materia oscura está distribuida más homogéneamente. Por eso no podemos decir mucho de la materia oscura si estudiamos, por ejemplo, el movimiento de los planetas del Sistema Solar: hay muy poca materia oscura en la región que ocupa. Para que se haga evidente la fuerza de gravedad de la materia oscura, hay que estudiar regiones grandísimas del espacio (por ejemplo, del tamaño de las galaxias).

Se están llevando a cabo muchos experimentos para detectar las WIMP, hasta ahora sin éxito. Como estas partículas hipotéticas interactúan débilmente con el resto de la materia, son extremadamente difíciles de detectar. La mayoría de los experimentos se realizan en el interior de profundas minas, donde se colocan contenedores con materia normal, la cual se observa con detectores muy sensibles para ver si por ahí pasa una WIMP. Los experimentos se hacen a grandes profundidades porque hasta ahí no penetran muchas partículas de materia normal que afectarían las mediciones.

Uno de los objetivos del recién inaugurado Gran Colisionador de Hadrones (véase “El Gran Colisionador de Hadrones. ¿Cómo ves?”, No. 114), ubicado en la frontera entre Francia y Suiza, es buscar entre las partículas que se producirán en las colisiones algunas que pudieran ser la materia oscura, o al menos estar relacionadas con ella de alguna manera.

Foto: Cortesía NASA / ESA, M. Bradac y S. Allen

Esta región del cielo muestra la colisión de dos cúmulos de galaxias. En rosa se muestra la materia normal, cuya presencia está trazada por su emisión de rayos X. La distribución de la materia oscura, cuya forma se infiere indirectamente por la manera en la que distorsiona la luz de las galaxias que se hallan detrás de la región de colisión, se muestra en azul. Mientras la materia normal (rosa) quedó detenida en la parte del choque, la materia oscura (azul) continuó viajando por el espacio sin afectarse.

Un grupo de astrónomos ha reportado recientemente lo que podría ser evidencia directa de la existencia de materia oscura. Los investigadores observaron dos cúmulos de galaxias que están chocando (las colisiones de cúmulos de galaxias duran miles de millones de años; sólo vemos un cuadro de una película muy larga). Mientras la parte de materia normal que hay en cada uno de los cúmulos choca y queda detenida en la región central de la zona de colisión, la materia oscura atraviesa la región como si nada y pasa de largo. La materia convencional se ve por la luz que emite, mientras que deducimos la presencia de la materia oscura por su fuerza de atracción gravitacional, que distorsiona la luz de las galaxias que están detrás de la región de colisión. Sin embargo, la interpretación de los datos no es sencilla y se sigue debatiendo qué ocurre realmente en este choque de cúmulos.

### La energía oscura

El Universo se formó hace unos 13 700 millones de años en una especie de explosión en la que se originó la materia (la normal y la oscura), así como el tiempo y el espacio. A partir de esta Gran Explosión, el Universo se ha estado expandiendo. En el principio, el Universo era prácticamente uniforme (sin estructura). No había estrellas, ni planetas, ni mucho menos seres humanos. Con la expansión, el Universo también se fue enfriando y se fueron condensando las galaxias, compuestas de miles de millones de estrellas.

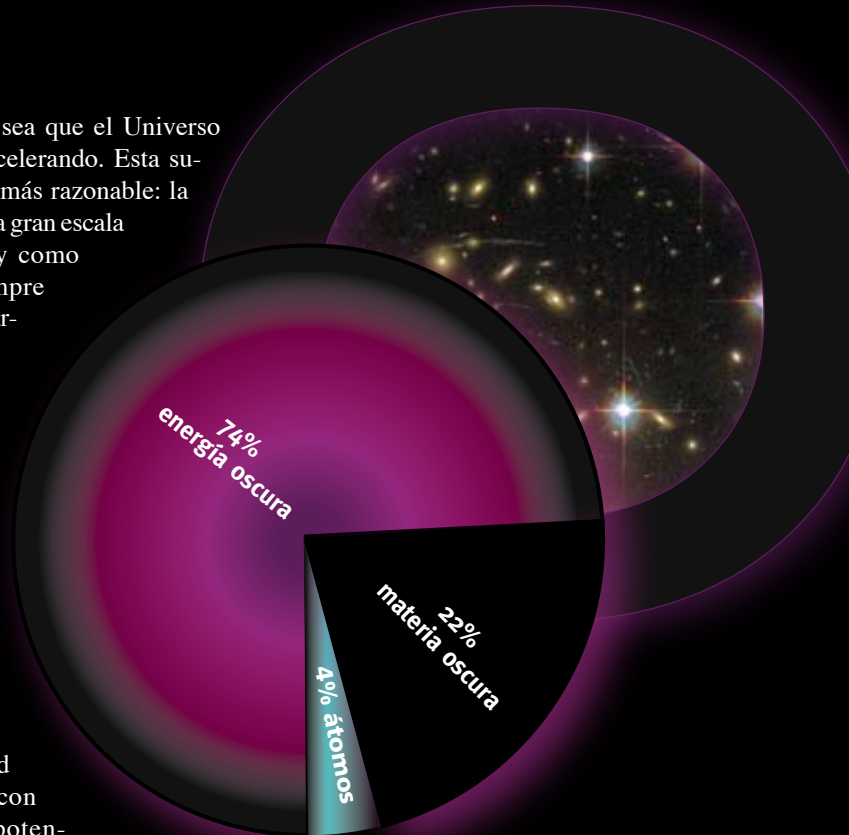
Algo muy interesante de la astronomía es que podemos estudiar el pasado del Universo porque la luz que nos llega de los astros viaja a una velocidad grande, pero finita (300 000 kilómetros por segundo). Cuando vemos un objeto lejano, en realidad estamos viéndolo como era hace cierto tiempo (el que ha tardado su luz en llegar a nuestros ojos). Por ejemplo, en el caso de la Luna, la luz tarda un segundo en llegar, de modo que la vemos como era hace un segundo. Mientras más lejano está un objeto, más atrás en el tiempo lo vemos. Al mismo tiempo, la luz de los objetos astronómicos contiene información acerca de la velocidad con que se alejan de nosotros. Con esta información podemos reconstruir la historia de la expansión del Universo.

Hasta hace poco, todos los astrónomos esperaban que la expansión fuese cada

vez mas lenta, o sea que el Universo se estuviera desacelerando. Esta suposición es de lo más razonable: la fuerza dominante a gran escala es la gravedad, y como la gravedad siempre atrae, frena a la larga la expansión del Universo. Es como lanzar una piedra hacia arriba: la piedra ascenderá, pero cada vez más lentamente, hasta detenerse y comenzar a caer. Si lanzo la piedra con gran velocidad —por ejemplo, con un cañón muy potente— podría ser que la piedra siga alejándose de la Tierra para siempre, pero su velocidad siempre irá disminuyendo. Con el Universo sucedía lo mismo: aún si se expandiera para siempre, la expansión debería ser cada vez más lenta.

En 1998 dos equipos de astrónomos usaron la luz de unas explosiones estelares muy remotas para reconstruir la historia de la expansión del Universo. Obtuvieron un resultado sorprendente. Cuando el Universo era joven, las cosas ocurrieron como se creía hasta entonces: el ritmo de expansión disminuía. Pero en los últimos 5 000 millones de años (más o menos la última tercera parte de la vida del Universo) ha pasado algo que no se esperaba: la expansión del Universo ha comenzado a acelerarse (véase “El lado oscuro del Universo”, *¿Cómo ves?*, No. 58). Está claro que la gravedad no basta para explicar esta aceleración. Es como si la piedra que tiramos hacia arriba, en lugar de ir cada vez más despacio, comenzara a acelerarse: podríamos concluir que algo la está afectando que no es la gravedad normal.

Aún queda la posibilidad de que las observaciones que implican que el Universo se acelera estén mal, lo que sería un alivio para muchos científicos. Pero éste no parece ser el caso. Es pues necesario introducir la idea de que el Universo está lleno de algo que contrarresta la atracción de la gravedad y



Los ingredientes del Universo.

produce una especie de fuerza de repulsión que separa las galaxias cada vez más rápido. En otras palabras, que existe un agente que produce “antigravedad”. A falta de un nombre mejor, este agente se conoce como *energía oscura*.

Ya podemos enumerar los ingredientes del Universo. Sólo 4% del contenido total de materia y energía está en forma de materia normal, los bien estudiados y entendidos protones, neutrones y electrones de los átomos. Cerca del 22% del contenido de materia-energía del Universo es materia oscura, la cual aún no detectamos directamente, pero de cuya naturaleza tenemos por lo menos ideas teóricas. El 74% es energía oscura, que nadie sabe qué es, aunque no faltan ideas especulativas de muchos tipos.

Así pues, el Universo está hecho principalmente de ingredientes que aún no entendemos. Pero la historia de la astronomía muestra que no hay que desesperar: como en el caso de Neptuno, el enigma un día se resolverá. Ese día entenderemos mejor el Cosmos. 🌑

Luis Felipe Rodríguez trabaja en el Centro de Radioastronomía y Astrofísica, Campus Morelia, de la UNAM.