

Luz tenue, misterio profundo: el lado oscuro de las galaxias más pequeñas del universo

ELIZABETH AMÉRICA FLORES FRÍAS Y
TADEO DARINEY GÓMEZ AGUILAR

La Dra. Flores Frías es Ingeniera Química egresada de la FCQel de la UAE-Mor. Posteriormente, cursó la Maestría y Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la UAEmor. Actualmente, se encuentra haciendo su posdoctorado en el Instituto de Ciencias Físicas (ICF) de la UNAM, desarrollando síntesis de inhibidores de corrosión mediante plasma.

El Mtro. Gómez Aguilar es Ingeniero en Sistemas Computacionales, egresado de la Universidad Valle del Grijalva. Posteriormente, obtuvo la Maestría en Física en la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la Universidad Autónoma de Chiapas. Actualmente, es candidato al grado de Doctor en Ciencias Físicas en el ICF-UNAM. Su investigación se enfoca en la cosmología del universo temprano, con especial atención al estudio de Agujeros Negros Primordiales y Ondas Gravitacionales.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Un universo, tres historias
La historia del universo es también la historia de nuestras preguntas. En el primer artículo de esta serie exploramos el Big Bang, esa gran explosión que encendió la llama del espacio, del tiempo y de nuestra curiosidad [1]. En la segunda entrega, exploramos el universo temprano y su naturaleza turbulenta y ardiente, cuando en su interior se gestaban las semillas de todo lo que hoy conocemos: partículas, núcleos atómicos, radiación y, quizás, los primeros agujeros negros [2].

En esta tercera entrega nos concentraremos en lo que permanece invisible ante nuestros mejores observatorios, pero que ejerce una influencia silenciosa en la arquitectura del cosmos. Si el principio fue un estallido, el presente se revela como un murmullo que aún no comprendemos del todo. Ese susurro que es aparentemente tenue ha despertado algunas de las preguntas más persistentes de nuestra era. ¿Qué conforma la mayor parte del universo, si no es materia visible? ¿Dónde se oculta la materia oscura? ¿Y qué pistas podrían esconderse en los rincones más discretos del cielo?

Mira en el cielo... ¿Qué es? ¿Es un avión? ¿Es una estrella? ¿Es un planeta? ¿No, es una galaxia!

A simple vista, el cielo nocturno parece estar poblado exclusivamente de estrellas. Algunas titilan, otras parecen más brillantes, y con un poco de suerte, podemos distinguir planetas como Venus o Júpiter. Pero entre todo ese brillo, también hay presencias mucho más lejanas y majestuosas: las *galaxias*.

Una galaxia no es una estrella solitaria, más bien, es un vasto conjunto de ellas. Miles de millones de estrellas, gas, polvo y materia oscura, todas girando en una coreografía cósmica, unidas por la



FIGURA 1. VISTA de la galaxia de Andrómeda (M31) bajo un cielo oscuro y despejado, capturada en luz visible. Esta galaxia espiral, está situada a unos 2.5 millones de años luz. Aunque a simple vista puede parecer solo una estrella difusa, se trata de un coloso cósmico con más de un billón de estrellas, y es la galaxia más cercana a la nuestra. Crédito de la imagen: ESO/S. Brunier.

gravidad. Y aunque podamos pensar en la Vía Láctea como un caso excepcional, lo cierto es que existen más galaxias que granos de arena en todas las playas de la Tierra. Algunas son colosales, otras apenas visibles. Algunas tienen formas espirales, otras elípticas, otras irregulares. Una de las galaxias más cercanas a nosotros, es Andrómeda, y fue durante siglos un enigma (Figura 1). En el año 964 d.C., el astrónomo persa Al Sufi la describió como una “*pequeña nube*”, sin imaginar que estaba observando otro universo-isa (un término que algunos astrónomos comenzaron a usar siglos después para referirse a las galaxias). Durante mucho tiempo se pensó que Andrómeda era solo una nube de gas o una formación estelar dentro de nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. Sin embargo, todo cambió en el siglo XX, cuando la astrónoma Henrietta Swan Leavitt hizo un descubrimiento crucial al estudiar un tipo especial de estrellas llamadas *cefeidas*.

Las cefeidas son estrellas que brillan con un cierto ritmo regular, como si estuvieran parpadeando. Lo interesante es que ese ritmo revela qué tan potente es su luz, como si cada una fuera una linterna con una intensidad conocida. Imagina que estás en el campo y sabes que una linterna específica de cierta marca siempre emite cierta cantidad de luz. Si la ves tenue, sabrás que está lejos; si la ves brillante, está más cerca. Con las cefeidas ocurre algo similar: los astrónomos miden el ritmo de su parpadeo y, gracias a una relación matemática conocida como la *relación período-luminosidad*, pueden saber cuánta luz emiten realmente.

Henrietta Leavitt descubrió que cuanto más lentamente “late” una cefeida, más luminosa es. Esa relación permitió, por primera vez, medir distancias a estrellas lejanas con gran precisión. Al aplicar este método a las cefeidas observadas en Andrómeda, el astrónomo Edwin Hubble demostró que esta “pequeña nube” estaba muchísimo más lejos de lo que cualquier objeto dentro de la Vía Láctea podría estar. Andrómeda no era parte de nuestra galaxia ¡Es una galaxia completamente aparte, inmensa y autónoma! [3]. Comprendimos que habitamos una galaxia entre muchas, y que cada pun-

to de luz tenue en el cielo podía ser una ventana a otra colección de soles. Sin embargo, no todas las galaxias son tan fáciles de detectar.

Estrellas... ¿Gas, polvo, y qué? ¿Materia qué?
Cuando imaginamos una galaxia, solemos pensar en un cúmulo de estrellas brillando en la inmensidad del espacio. Y no es una imagen equivocada: las galaxias están formadas, en gran parte, por estrellas de todos los tamaños, edades y colores (estas diferencias se deben a la composición de las estrellas, por ejemplo, el contenido de hidrógeno, helio y otros metales), así como a su temperatura y etapa evolutiva. Algunas estrellas jóvenes y calientes brillan con un azul intenso, mientras que otras, más viejas y frías, resplandecen en tonos rojizos. Pero no solo eso. También contienen nubes de gas interestelar, regiones de formación estelar, remanentes de supernovas y enormes cantidades de polvo cósmico. Sin embargo, a pesar de todo lo que podemos observar con nuestros telescopios, existe algo más. Algo que no emite luz, que no absorbe ni refleja radiación, pero cuya presencia es innegable por su efecto gravitacional. A eso le llamamos *materia oscura*.

La primera pista vino en la década de 1930, cuando el astrónomo suizo Fritz Zwicky, al estudiar el cúmulo de Coma, notó que las galaxias que lo componían se movían mucho más rápido de lo que deberían si solo existiera la masa visible. Propuso entonces que debía existir una “masa faltante” que generaba una gravedad extra, manteniendo unido al cúmulo. Pero su hipótesis fue recibida con escepticismo y durante años se consideró una curiosidad.

No fue sino hasta los años 70 que el enigma resurgió con fuerza, gracias al trabajo pionero de la astrónoma Vera Rubin. Rubin y su colega Kent Ford estudiaron con precisión la velocidad de rotación de las estrellas en diferentes partes de la galaxia de Andrómeda [4]. Lo que encontraron fue sorprendente: las estrellas en los bordes externos no giran más lentamente, como lo predecían los modelos teóricos, sino casi a la misma velocidad que las del centro (Figura 2). Era como si

una gran cantidad de masa invisible envolviera la galaxia, ejerciendo una fuerza gravitacional constante. Ese patrón se repitió en galaxias tras galaxias, convirtiéndose en una de las pruebas más sólidas de la existencia de materia oscura. Aunque Rubin no descubrió qué es, nos mostró con claridad que está ahí, ocultándose en cada rotación galáctica.

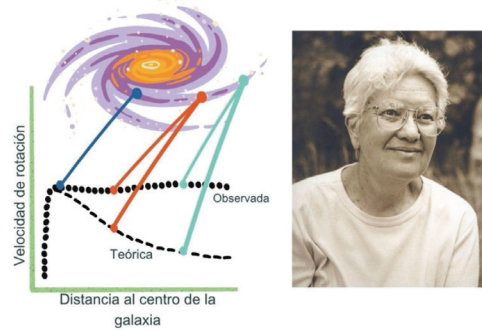


FIGURA 2. A la izquierda, una representación esquemática del descubrimiento de Vera Rubin. Las curvas de rotación galácticas observadas (línea punteada superior) se mantuvieron planas a grandes distancias, en contraste con las predicciones teóricas (línea punteada inferior) basadas únicamente en la materia visible (ilustración de la Dra. Gabriela García Arroyo). A la derecha, la astrónoma Vera C. Rubin en 1994. Imagen de los Archivos del Observatorio Nacional de Radioastronomía (NRAO/AUI). <https://www.nrao.edu/archives/items/show/15811>

“Lo más emocionante de la ciencia es no tener todas las respuestas”, solía decir Rubin quien falleció en el 2016, no sin antes dejarnos un legado a través de su trabajo, paciencia y rigor, la cual ha inspirado y seguirá inspirando a generaciones de investigadoras e investigadores. Porque entender la materia oscura no es solo un reto técnico: es una forma de mirar el universo y reconocer que lo esencial, muchas veces, no se ve.

Entonces... ¿Qué es la materia oscura?

¡No lo sabemos! Esa es, quizá, una de las respuestas más emocionantes y provocadoras que puede ofrecer la ciencia. Actualmente no se tiene una descripción definitiva de qué está hecha la materia oscura. No brilla, no emite ni refleja luz y no interactúa con la materia común de forma electromagnética.

¿Algún candidato?
Durante décadas, los físicos han propuesto que la materia oscura podría estar compuesta por partículas completamente nuevas. Uno de los candidatos más estudiados son las WIMPs (del inglés *Weakly Interacting Massive Particles*), partículas masivas que interactúan débilmente. Estas partículas tendrían masa, pero apenas interactuarían con la materia común, lo que las haría difíciles de detectar. Otro candidato es los *axiones*: partículas extremadamente ligeras e hipotéticas que también podrían constituir la materia oscura. Diversos experimentos, como ADMX, están en marcha para intentar detectarlos, pero hasta la fecha, los resultados no han sido concluyentes. Algunos científicos han propuesto que,

en lugar de postular nuevas partículas, podríamos necesitar modificar nuestras leyes de la gravedad para explicar las observaciones atribuidas a la materia oscura, y de esta manera intentar explicar fenómenos como las curvas de rotación de las galaxias. Aunque estas teorías pueden explicar algunos aspectos, enfrentan dificultades para ajustarse a todas las observaciones cosmológicas.

Para descubrir la verdadera naturaleza de la materia oscura, la comunidad científica ha desarrollado distintas estrategias de detección. Los experimentos de detección directa (LUX y XENONIT), buscan señales de colisiones raras entre partículas de materia oscura y núcleos atómicos. Por otro lado, la detección indirecta intenta captar los productos de su aniquilación o desintegración, como rayos gamma o neutrinos. A nivel cósmico, las observaciones astrofísicas y cosmológicas analizan los efectos gravitacionales de esta materia invisible, a través de la formación de las galaxias y su evolución.

Las galaxias más pequeñas son los secretos más grandes

Las galaxias enanas son sistemas galácticos de tamaño y luminosidad reducidos, compuestos por millones a unos pocos miles de millones de estrellas, en contraste con las galaxias más grandes que pueden albergar cientos de miles de millones de estrellas (Figura 3). Estudios han demostrado que, en algunas de estas galaxias, la masa de materia oscura puede ser de decenas a miles de veces mayor que la de la materia luminosa. Esta predominancia de materia oscura se infiere a través de observaciones de las velocidades de las estrellas dentro de estas galaxias. Las velocidades observadas no pueden explicarse únicamente por la masa visible, lo que sugiere la presencia de una cantidad significativa de masa no luminosa que influye gravitacionalmente en el movimiento estelar.



FIGURA 3. LA galaxia enana DDO 68, captada por el Telescopio Espacial Hubble. Galaxias de este tipo, pequeñas y aparentemente primitivas, son clave para estudiar la materia oscura. Crédito de la imagen: ESA/Hubble & NASA

Una forma de visualizar este fenómeno es con el *cociente masa-luz*, medido en unidades solares: un valor de 1 significa que la masa total de un objeto es igual a la masa del Sol por cada unidad de luminosidad solar. En galaxias como la nuestra, este cociente es de unas pocas unidades.

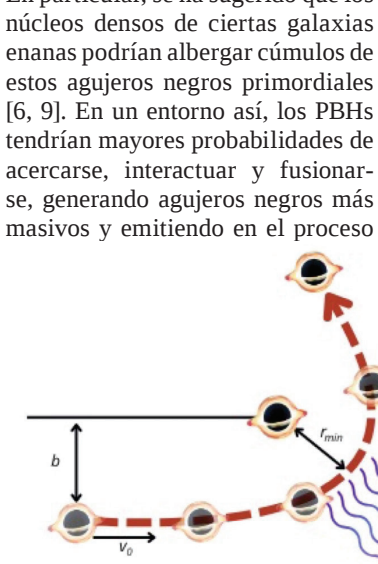
Pero en muchas galaxias enanas, este número es enorme: hay cocientes masa-luz de 100, 300, ¡hasta 1000 veces! Esto significa que, por

cada kilogramo de materia visible, hay cientos o miles de kilogramos de algo más. Esto ha sido medido con gran precisión en galaxias como Canes Venatici I o Coma Berenices, satélites ultra débiles de la Vía Láctea, que tienen apenas unos pocos millones de masas solares y radios que pueden ser tan pequeños como 20 parsecs (alrededor de 65 años luz), lo que indica una densidad central asombrosamente alta si consideramos la cantidad de materia oculta [5,6].

Sin embargo, no todo es tan claro, uno de los debates actuales en cosmología es por qué la densidad central de algunas galaxias enanas parece ser menor de lo que predicen los modelos estándar de materia oscura fría. Este conflicto, conocido como el problema del *cúspide-núcleo*, se refiere a que las simulaciones predicen centros muy densos (cúspides), mientras que las observaciones sugieren centros más suaves (núcleos) [7]. Las galaxias enanas son el escenario donde esta tensión se hace más evidente. Esto ha llevado a teorías alternativas, incluyendo la posibilidad de que la materia oscura tenga propiedades no estándar (como interacciones propias), o que esté compuesta por agujeros negros primordiales, cuyo comportamiento dinámico podría resolver este problema al “calentar” gravitacionalmente el núcleo de la galaxia [6,7,8].

¿Y si la materia oscura fuesen agujeros negros primordiales?

Como lo mencionamos en nuestro anterior artículo [2], se ha propuesto que la materia oscura está compuesta por agujeros negros primordiales. A diferencia de los agujeros negros que nacen al final de la vida de una estrella, los PBHs (del inglés *Primordial Black Holes*) habrían surgido mucho antes, durante los primeros instantes del universo, a partir del colapso gravitacional de fluctuaciones de densidad extremadamente grandes, cuando el cosmos apenas comenzaba a expandirse tras el Big Bang [1, 2]. En particular, se ha sugerido que los núcleos densos de ciertas galaxias enanas podrían albergar cúmulos de estos agujeros negros primordiales [6, 9]. En un entorno así, los PBHs tendrían mayores probabilidades de acercarse, interactuar y fusionarse, generando agujeros negros más masivos y emitiendo en el proceso



ondas gravitacionales: ondas en la curvatura del espacio-tiempo que, desde 2015, han sido detectadas por observatorios como LIGO, Virgo y KAGRA [6, 9]. Estas señales cósmicas, captadas a más de mil millones de años luz, podrían no estar contando historias de estrellas, sino de materia oscura interactuando mediante colisiones o encuentros cercanos, y produciendo un fondo de ondas gravitacionales [9].

En un cúmulo denso de PBHs, las interacciones gravitacionales no solo son inevitables, sino fundamentales. Cuando dos de estos objetos se aproximan bajo la acción de la gravedad, pueden seguir dos trayectorias distintas, dependiendo de su energía y del ángulo de acercamiento (Figura 4). En el caso de los encuentros hiperbólicos cercanos (CHES del inglés *Close Hyperbolic Encounters*), los PBHs se aproximan brevemente, habrían alcanzado una distancia mínima muy pequeña y luego se separan, emitiendo en el proceso una ráfaga intensa pero breve de ondas gravitacionales. Como no se forma un sistema ligado, estos eventos son estadísticamente más frecuentes, ya que no requieren una pérdida significativa de energía.

Por otro lado, si durante el acercamiento los PBHs emiten suficiente radiación gravitacional como para quedar atrapados mutuamente, se forma un sistema binario. Estos pares comenzarán a orbitarse, emitiendo ondas gravitacionales de manera continua hasta su eventual fusión, generando señales más largas y características.

Los CHES son más probables que las capturas binarias, debido a que basta con que los PBHs pasen lo suficientemente cerca. Por ello, se considera que los encuentros cercanos podrían ser una fuente dominante del fondo estocástico de ondas gravitacionales. Detectar este murmullo gravitacional abriría una nueva ventana para estudiar la dinámica invisible de la materia oscura, revelando interacciones que hasta ahora han permanecido completamente ocultas.

El murmullo del cosmos: fondo estocástico de ondas gravitacionales

El fondo estocástico de ondas gravitacionales (SGWB del inglés para *Stochastic Gravitational Wave Background*) es una superposición de muchas señales de ondas gravi-

cionales que se originan de forma aún no resoluble en el universo. Podría compararse con el zumbido de muchas conversaciones en una habitación: no se distingue la voz individual, pero el ruido global es detectable.

Este zumbido cósmico podría tener múltiples orígenes: fusiones de agujeros negros supermasivos en el centro de las galaxias, múltiples colisiones de estrellas de neutrones, procesos del universo temprano o como interacciones entre PBHs. En particular, los CHES y las fusiones binarias dentro de cúmulos densos de PBHs podrían generar un fondo gravitacional que se acumula a lo largo de miles de millones de años, especialmente en galaxias enanas, donde estas poblaciones podrían haberse preservado desde épocas tempranas [9].

La detección de este fondo es ya una realidad. En 2023, el consorcio LIGOGrav detectó una señal consistente con un SGWB en frecuencias bajas, del orden de los *nanohertz*. Este hallazgo fue confirmado por otras colaboraciones como EPTA, PPTA e InPTA. Aunque el origen exacto aún no se conoce, abre la puerta a la posibilidad de que algunas de estas ondas provengan de interacciones entre objetos como agujeros negros [10].

Para poner en perspectiva lo que significa una señal en nanohertz: una frecuencia de 10 nanohertz implica que la onda observada completa una sola oscilación cada tres años. En contraste, las ondas utilizadas en nuestras tecnologías cotidianas, como la radio FM, oscila a 100 megahertz, es decir, 100 millones de veces por segundo, mientras que una señal Wi-Fi oscila en el rango de los gigahertz, o miles de millones de oscilaciones por segundo.

Sin embargo, el futuro de la detección gravitacional se extiende a otras bandas de frecuencia. El observatorio espacial LISA (del inglés *Laser Interferometer Space Antenna*), cuyo lanzamiento está previsto para mediados de la década de 2030, observará el cielo en el rango de los milihertz. Por otro lado, interferómetros terrestres de tercera generación como el Einstein Telescope (ET) en Europa y el Cosmic Explorer (CE) en Estados Unidos extenderán la sensibilidad actual de LIGO y Virgo, permitiendo observar con mayor profundidad las señales procedentes de objetos más livianos y desde mayores distancias cósmicas [11].

Con esta evidencia, tal vez aún sea más claro que vivimos en un universo que no solo se expande, sino que vibra en silencio. Hoy aún no sabemos qué es la materia oscura, pero quizás, entre esas olas de gravedad, aún ocultas en el murmullo del cosmos, resuenen las claves que revelarán de qué está hecho el universo.

Referencias:

1. Flores Frías, E. A., & Gómez Aguilar, T. D. *El Big Bang: la punta del iceberg que detonó más interrogantes sobre el origen del universo*. La Unión de Morelos, Marzo 31, 2025. <https://acmor.org/publicaciones/el-big-bang-la-punta-del-iceberg-que-deton-m-s-interrogantes-sobre-el-origen-del-universo>

2. Flores Frías, E. A., & Gómez Aguilar, T. D. *Las semillas oscuras del universo: una pista sobre los primeros segundos*. La Unión de Morelos, Mayo 19, 2025. <https://acmor.org/publicaciones/las-semillas-oscuras-del-universo-una-pista-sobre-los-primeros-segundos>

3. María Luisa Santillán. *El legado astronómico de Edwin Hubble, a 100 años del gran descubrimiento de la galaxia Andrómeda*. Ciencia UNAM, noviembre 29, 2025. <https://ciencia.unam.mx/leer/1547/el-legado-astronomico-de-edwin-hubble-a-100-anos-del-gran-descubrimiento-de-la-galaxia-andromeda>

4. Rubin, V. C., et al., (1978). Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV. Systematic dynamical properties, *SA through Sc. Astrophysical Journal Letters*, 225, L107–L111. <https://doi.org/10.1086/182804>

5. Simon, J. D., & Geha, M. (2007). The kinematics of the ultra-faint Milky Way satellites: Solving the missing satellite problem. *The Astrophysical Journal*, 670(1), 313–331. <https://doi.org/10.1086/521816>

6. Erfani, E., et al., (2022). Hierarchical merger of primordial black holes in dwarf galaxies. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2022(09), 034. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2022/09/034>

7. Boldrini, P., et al., (2020). Cusp-to-core transition in low-mass dwarf galaxies induced by dynamical heating of cold dark matter by primordial black holes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(4), 5218–5225. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa150>

8. Stegmann, J., et al., (2020). Improved constraints from ultra-faint dwarf galaxies on primordial black holes as dark matter. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(4), 5247–5260. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa170>

9. García-Bellido, J., et al., (2022). The stochastic gravitational wave background from close hyperbolic encounters of primordial black holes in dense clusters. *Physics of the Dark Universe*, 37, 100932. <https://doi.org/10.1016/j.dark.2022.100932>

10. Antoniadis, J., et al., (2022). The International Pulsar Timing Array second data release: Search for an isotropic gravitational-wave background. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 510(4), 4873–4887. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3418>

11. Sesana, A. (2021). Black hole science with the Laser Interferometer Space Antenna. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8, 601646. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.601646>

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses con vencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos.