

FIGURA 1. Imagen en infrarrojo del plano galáctico observado por el telescopio espacial *Spitzer*. *Nessie* es claramente visible como una sombra serpenteante respecto al fondo que cruza toda la zona central de la imagen. (NASA/JPL-Caltech/Univ. of Wisconsin)

Paleontología galáctica

Los astrónomos descubren *Nessie* y *Maggie*: posibles eslabones perdidos de la evolución galáctica y las nubes moleculares

Jorge Abreu-Vicente



Podrían pertenecer al «esqueleto» de la Vía Láctea, y conectarían la formación estelar a escalas galácticas con la evolución de nuestra Galaxia. Los astrofísicos llevan décadas desentrañando los misterios de la formación estelar y su conexión con la evolución galáctica y el origen de las nubes moleculares. *Nessie* y *Maggie* pueden ser la clave que desvele el secreto.

HERSCHEL REVELA QUE UNAS ESTRUCTURAS FILAMENTOSAS DOMINAN LA FORMACIÓN ESTELAR

El campo de la formación estelar vivió una revolución la pasada década gracias a las observaciones en el infrarrojo lejano del Observatorio Espacial *Herschel*, construido y operado por la Agencia Espacial Europea. Antes del lanzamiento de este monstruo de la tecnología, hoy

fuera de servicio y eclipsado por el lanzamiento del Telescopio Espacial James Webb, los astrónomos ya sabíamos que las estrellas se forman en las zonas más frías y densas del universo: los núcleos de las nubes moleculares. Sin embargo, la inigualable, para la época, resolución angular de *Herschel*, cambiaría para siempre nuestra visión de los procesos físicos que dan lugar a la formación estelar.

Herschel reveló una imagen mucho más detallada de los procesos de formación estelar y evolución de nubes moleculares. Los núcleos de formación estelar, antes supuestos más bien esféricos, eran expuestos por *Herschel* como una telaraña de estructuras de forma filamentosa. De hecho, *Herschel* descubrió las nubes moleculares como una sociedad ordenada por jerarquías de filamentos de material en creciente densidad. Estos filamentos, observados principalmente en nuestra vecindad galáctica (distancias menores a 3000 años luz), tienen típicamente longitudes de entre 1 y 30 años luz y contienen hasta mil masas solares. Los puntos en que estos filamentos convergen y colisionan son los lugares de mayor actividad de formación estelar. La evidencia observacional actual sugiere que es en estos «cruces» donde se crean cúmulos abiertos como las Pléyades o el Cúmulo de la Mariposa.

Herschel culminaba así una de las grandes batallas entre teoría y observaciones. Durante décadas, la teoría y las simulaciones numéricas ya mostraban que el medio interestelar y las nubes moleculares debían estar dominados por componentes filamentosos, resultados ocultos a la tecnología observacional pre-*Herschel*. Pero este telescopio confirmó los filamentos como componentes principales del medio interestelar. Además, *Herschel* situaba a los filamentos como los lugares donde comienza la gestación de las estrellas.

NESSIE, UN FILAMENTO QUE DESAFÍA LAS LEYES DE LA GRAVEDAD

Simultáneamente, James Jackson (Boston University) hizo un asombroso descubrimiento en los datos

del observatorio infrarrojo espacial *Spitzer*. Jackson encontró una monstruosa estructura filamentosa, bautizada como *Nessie* en honor del mítico monstruo del Lago Ness. El nombre se debe al parecido observacional con una gran serpiente cósmica, visible como una negra cuerda ondulatoria sobre el fondo de emisión infrarroja de la Vía Láctea. Jackson calculó que *Nessie* tiene una longitud de 240 años luz y contiene material suficiente para formar cuarenta mil soles. Estos números aumentaron a 300 años luz y cien mil masas solares en un trabajo posterior de Alyssa Goodman (Center for Astrophysics, CfA, Harvard). La anchura de *Nessie* no supera los 2 años luz. Este descubrimiento dejó boquiabiertos a los astrónomos debido a su clara desviación del resto de estructuras filamentosas conocidas hasta la fecha, al menos diez veces más pequeñas y cien veces menos masivas. Impactó aún más en la comunidad teórica ya que, siguiendo las teorías sobre formación estelar, un filamento de tal magnitud no debería ser observable. Bajo la acción de la gravedad, *Nessie* debería colapsar sobre su eje longitudinal de una forma tan rápida que su observación no sería posible.

Las preguntas llegaban solas: ¿debemos revisar nuestras teorías de formación estelar? ¿existirán otros *Nessies* en nuestra Galaxia? Una característica muy interesante de *Nessie* es que las observaciones muestran que es parte de uno de los brazos espirales de la Vía Láctea. Anteriormente se había teorizado con la existencia de densas estructuras filamentosas a gran escala que podrían ser partes fundamentales de las galaxias espirales. Así, Goodman bautizó a *Nessie* como

FIGURA 2. Dos nubes moleculares (Orión B y IC 5146) observadas por *Herschel*. Las líneas superpuestas muestran los filamentos moleculares que componen ambas nubes. (D. Arzoumanian et al., 2019)

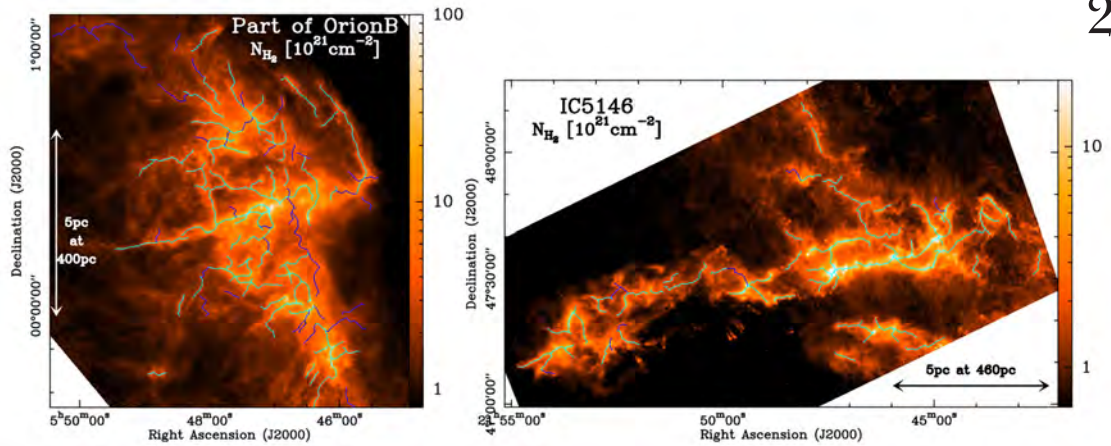
FIGURA 3. Esquema de cómo se mueve el gas de los filamentos y cómo los cúmulos estelares se forman en los cruces de los filamentos. Imagen adaptada de Sugitani et al., 2011.

el primer «hueso» galáctico. Si hubiera una red de filamentos similares y dado que las estrellas se forman en filamentos, podríamos estar ante la respuesta a la elusiva pregunta de cómo se forman las estrellas en el contexto galáctico. A pesar del buen conocimiento actual sobre el proceso puntual de formación estelar, la formación estelar en el contexto galáctico es una de las grandes preguntas abiertas en la astronomía. Y para más excitación, la relación de la formación estelar con la evolución y formación de nubes moleculares ayudaría también a entender otra de las grandes incógnitas: los procesos físicos implicados en la creación y evolución de las nubes moleculares. La jugada estaba clara y había mucho en ello. Los astrónomos debían convertirse en paleontólogos cósmicos y desenterrar el esqueleto galáctico.

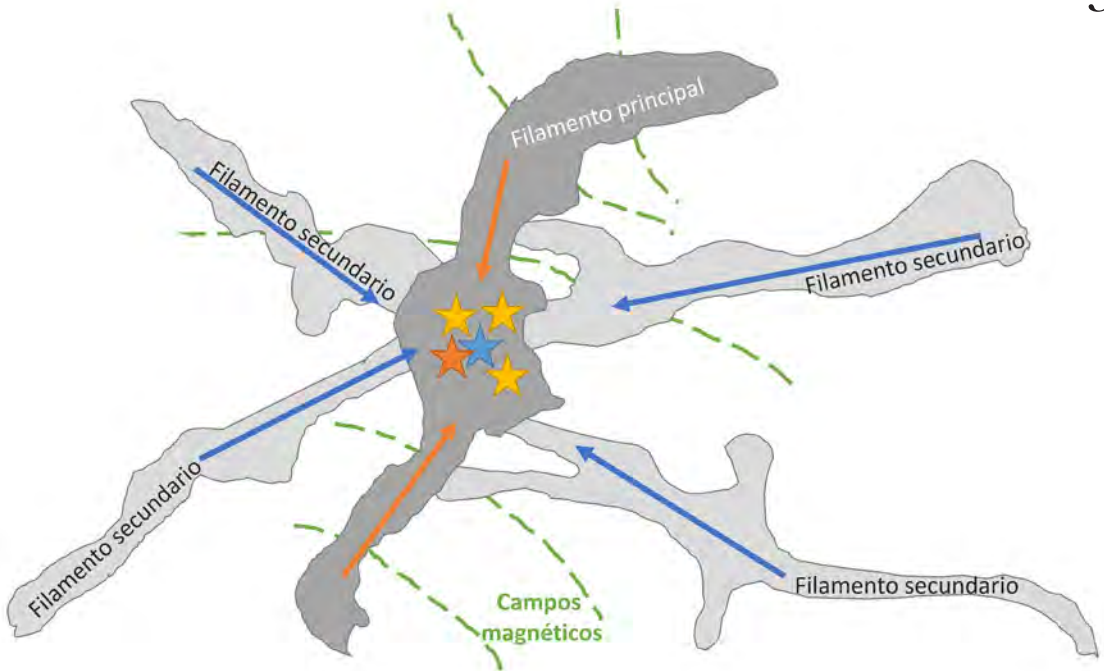
PALEONTOLOGÍA GALÁCTICA: DESENTERRANDO EL ESQUELETO

Primeramente, se debía obtener un censo de estructuras similares a *Nessie* tan completo como fuera posible. Esto confirmaría la existencia del esqueleto galáctico. Este trabajo estuvo principalmente dirigido por dos grupos de investigación: el MPIA (Max-Planck-Institute for Astronomy), Heidelberg, Alemania y el Center for Astrophysics, CfA, EE. UU. Estos esfuerzos mostraron que *Nessie* no

2



3

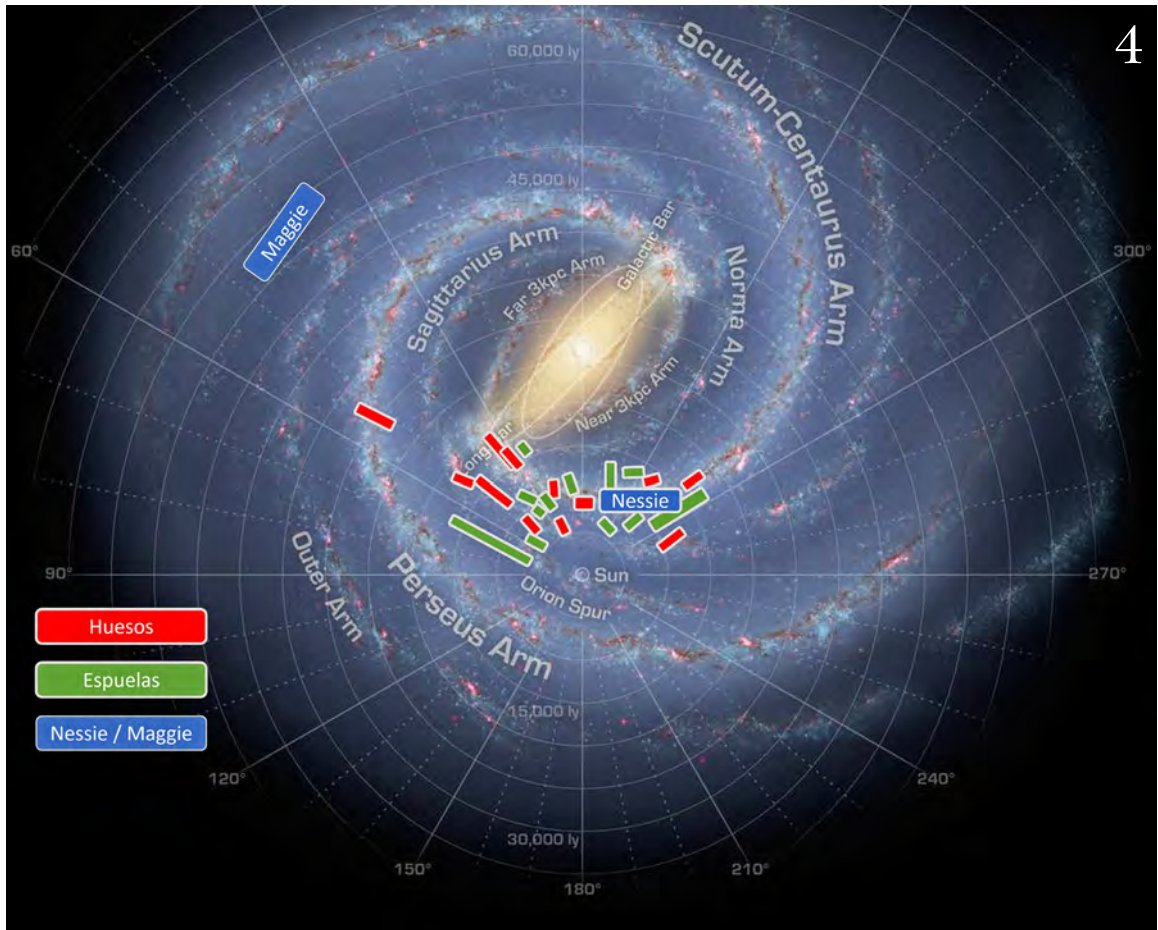


es una anomalía. Alrededor de una treintena de estructuras filamentosas a gran escala fueron descubiertas en los datos obtenidos por diversos telescopios, incluyendo los ya mencionados *Herschel* y *Spitzer*, y el radiotelescopio APEX en Atacama, Chile. Los

bautizados como filamentos moleculares gigantes o «huesos» tenían longitudes de hasta 500 años luz y contenían masas de hasta cien mil soles. Estos trabajos mostraron además que los filamentos gigantes no se encuentran únicamente en los brazos espirales como *Nessie*,

sino que pueden aparecer también en regiones interbrazo.

Estos resultados dejaban otra pregunta clara: ¿hay diferencias fundamentales en las propiedades de los filamentos moleculares gigantes dependiendo de si se hallan en los brazos espirales («huesos») o



fuera de ellos («espuelas»)? La respuesta vino de la mano del astrofísico español Jorge Abreu Vicente, entonces en el MPIA. En su trabajo, publicado en 2016, concluye que los «huesos» de los brazos espirales tienen mucho mayor potencial para la formación de estrellas que las «espuelas» de las regiones interbrazo. Esta conclusión se obtuvo analizando la densidad del gas que forma los filamentos gigantes. Un trabajo previo del mismo autor muestra que cuanto mayor es la porción de gas denso en una nube molecular, mayor es su actividad de formación estelar. ¿Son estos resultados similares en otras galaxias espirales?

BUSCANDO ESQUELETOS EN OTRAS GALAXIAS

Hasta este momento, los estudios sobre filamentos moleculares gigantes se habían hecho en la Vía Láctea. La razón es que, gracias a la cercanía de nuestra Galaxia, nuestros telescopios ofrecen mayor resolución espacial de las nubes moleculares en comparación a la que obtenemos de galaxias como Andrómeda. Desafortunadamente, el estudio de estas estructuras en la Vía Láctea viene con inconvenientes para los astrónomos. El principal es que debido a que nuestro Sistema Solar se encuentra en el mismísimo plano galáctico, nuestra visión no es tan directa como podría serlo

FIGURA 4. Distribución de los huesos (rojo) y espuelas (verde) mostrados por Abreu-Vicente [2016] en el plano galáctico. Maggie y Nessie se resaltan para mayor claridad. (Imagen de fondo NASA/JPL-Caltech/R. Hurt –SSC/Caltech–, adaptada por el autor, referencia 1)

FIGURA 5. Imagen en color de la galaxia M 51 (Hubble) con la emisión de la molécula de monóxido de carbono sobreimpuesta en azul (PAWS). (PAWS/IRAM/NASA HST/T. A. Rector –University of Alaska, Anchorage–)

si pudiéramos observar la Galaxia desde su zénit. Por ello, el descubrimiento de los filamentos moleculares gigantes, así como la determinación de si estos se hallan asociados o no a un brazo espiral está sujeto a



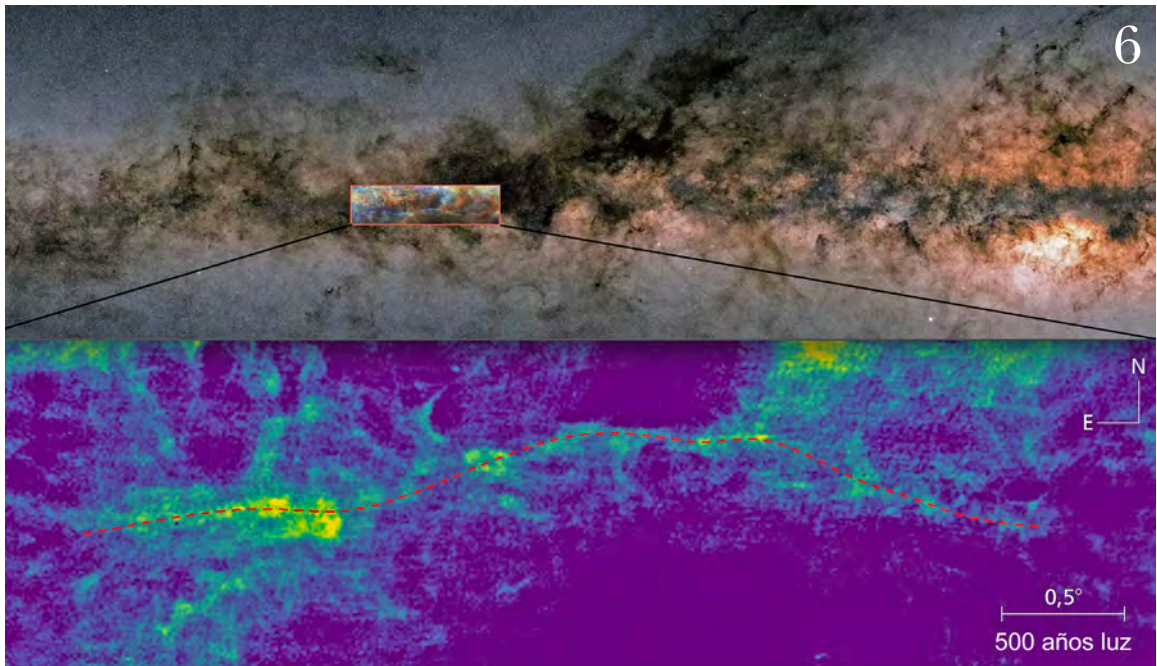
importantes incertidumbres experimentales. Es por ello por lo que el siguiente paso en la aventura de entender qué es *Nessie* y qué puede decirnos ha de darse en una de nuestras galaxias vecinas.

La candidata ideal para este estudio debería de ser una galaxia lo suficientemente cercana para que nuestros telescopios puedan resolver filamentos gigantes individuales. Además, esta galaxia ha de tener una forma espiral bien definida y estar prácticamente de cara a nosotros. Así las cosas, la mejor candidata para ser laboratorio de estudio intergaláctico es la Galaxia Remolino, M 51. Esta fue observada con los telescopios

NOEMA del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (Plateau de Bure, Francia) y el radiotelescopio de 30 metros de Pico Veleta (Granada). El proyecto, conocido como PAWS, pudo observar más de mil quinientas nubes moleculares a resoluciones de unos 100 años luz en el disco de M 51. PAWS tiene la ventaja de que estudió las nubes moleculares en la emisión de la molécula de monóxido de carbono, que es la misma usada por el trabajo de Abreu Vicente. Por ello, las comparaciones entre ambos trabajos son posibles sin añadir incertidumbres extra. Los resultados de PAWS muestran que M 51 está formada por una

gran cantidad de estructuras similares a *Nessie* y los otros filamentos gigantes descubiertos en la Vía Láctea. Los resultados de PAWS muestran también la tendencia de los «huesos» a ser más largos y tener mayor potencial de formación estelar que las «espuelas».

Así pues, los astrónomos habían desvelado la existencia de un esqueleto galáctico, que podría ser una estructura fundamental para explicar la evolución galáctica de galaxias espirales, así como los procesos de formación estelar a escala galáctica y la creación y evolución de nubes moleculares, que son los principales objetos del medio interestelar.



LAS SIMULACIONES DAN PISTAS SOBRE EL ESQUELETO GALÁCTICO Y PROTEGEN LA LEY DE LA GRAVEDAD

La comunidad teórica también ha hecho denodados esfuerzos para explicar la existencia de estos filamentos gigantes que, recordemos el inicio del artículo, no deberían existir. Esta afirmación proviene de un estudio puramente gravitatorio de los filamentos. Efectivamente, si la gravedad fuera la única fuerza actuando, filamentos como *Nessie* no deberían ser observables, puesto que colapsarían sobre su eje en escalas de tiempo minúsculas comparadas con las típicas escalas cósmicas. Anna Duarte Cabral y Claire Dobbs (Cardiff University y University of Exeter) usan simulaciones a gran escala de galaxias espirales para estudiar, en alta resolución, la evolución de una galaxia espiral a lo largo de once millones de años.

Las dos investigadoras encuentran la respuesta a por qué los filamentos gigantes son observables

por los astrónomos. La vida de los filamentos gigantes comienza en regiones interbrazo como las denominadas espuelas. Las espuelas suelen fraccionarse en unidades más pequeñas a la vez que se van acercando paulatinamente a los brazos espirales. Una vez llegan a los brazos espirales, las simulaciones muestran claramente que parte de las espuelas colisiona con nubes moleculares del brazo espiral, perdiendo su forma filamentosa y generando formación estelar en el proceso. Otra parte de estas espuelas se asienta en el centro de los brazos espirales sin perder la forma filamentosa. Así, las espuelas se convierten ahora en los llamados huesos. Este proceso se da en unas escalas típicas de cinco o diez millones de años.

El gas de estos huesos tiene una gran cantidad de energía debida a la turbulencia. Esta energía actúa en contra de la gravedad, intentando expandir el gas de los filamentos. Sin embargo,

FIGURA 6. Arriba, imagen visible del plano galáctico obtenida por *Gaia*. Abajo, ampliación de las observaciones de *Maggie* obtenidas con el proyecto THOR. [ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO y T. Müller/J. Syed/MPIA]

los campos magnéticos y la presión externa generada por fuerzas como la rotación de los brazos espirales hacen que el gas de los huesos se quede confinado en el centro de los brazos espirales. Y aquí se encuentra la clave. Los huesos no están sujetos solo a la gravedad, sino también a la turbulencia, campos magnéticos y rotación que se oponen a la fuerza Newtoniana. Así los huesos pueden ser observados, en contra de lo que mostraban los modelos basados en la gravedad.

Además, Duarte Cabral y Dobbs habían simulado la evolución de los huesos y espuelas y desvelado que es cuando las últimas se adentran en los brazos espirales que la formación estelar tiene lugar. Ahora la pelota está en el lado de los as-

trofísicos observacionales. Estas simulaciones han de ser corroboradas con nuestros telescopios.

Para ello, los astrónomos deberán usar observaciones de extremadamente alta resolución. La única opción posible es ALMA. Las simulaciones de Duarte Cabral y Dobbs se pueden usar para generar imágenes artificiales y así diseñar los experimentos necesarios a hacer con ALMA. Un estudio piloto se haría en una primera ronda, seguido por más observaciones una vez el estudio piloto muestre la viabilidad del experimento. Este procedimiento sitúa el siguiente capítulo de esta historia hacia la segunda parte de nuestra década, siempre que el experimento sea factible.

MAGGIE: UN POSIBLE PRECURSOR DE NESSIE

En enero de 2022 un equipo de astrónomos liderado por J. Syed, MPIA, usó datos del *Very Large Array* (EE. UU., popularizado en la película *Contacto*) para encontrar una nueva estructura filamentosa que podría ser el origen de todas las anteriores. A diferencia de los trabajos previos, Syed usa datos del proyecto THOR, que se basan en la emisión de átomos de hidrógeno neutro. Esto significa que Syed estudia el conocido como medio atómico, en contraste con el medio molecular que fue observado en los trabajos mencionados con anterioridad. El interés de esta diferencia se entiende si pensamos que las nubes moleculares (medio molecular) están generalmente contenidas en extensas concentraciones de nubes atómicas como las que se observan en este trabajo. Además, la evidencia y teoría sugieren que las nubes moleculares se forman en el medio atómico. Syed publica el

descubrimiento de un filamento gigante observable en THOR, no relacionado con ninguno de los trabajos previos.

El filamento descubierto por Syed, bautizado como *Maggie* en honor al colombiano río Magdalena, tiene unos 3900 años luz de longitud, una anchura de 130 años luz y una masa de tres cuartos de millón de soles y es un caso único hasta ahora. El origen de *Maggie* es un misterio para sus descubridores. Sin embargo, *Maggie* es una pieza clave en todo este estudio. Y es que *Maggie* podría ser precursor de estructuras como *Nessie*. Si *Nessie* podía ser la clave para entender la formación estelar a escala galáctica, *Maggie* puede ser la clave para entender el origen de las nubes moleculares, otra de las grandes preguntas abiertas en la astronomía. De hecho, el equipo liderado por Syed reporta también una serie de posibles filamentos a menor escala dentro de *Maggie* y un 8 % de material molecular que podrían ser la creación de estructuras más similares a las espuelas o a *Nessie*.

Una década de arduo trabajo observacional y teórico ha traído mucha luz sobre el origen de *Nessie* y su papel como bloque fundamental en la Vía Láctea y su formación estelar. Al contrario que en el legendario lago escocés, *Nessie* existe y tiene un mensaje para nosotros. El estudio de *Nessie* ha desvelado la existencia de un esqueleto galáctico que deja a los astrónomos más cerca de desentrañar tres de los grandes misterios: la evolución galáctica, el papel de la formación estelar en ella, y la formación de las nubes moleculares. Esta década puede ver las respuestas a tres de las más importantes preguntas de la astronomía. (A)

Bibliografía

- Abreu-Vicente, Jorge *et al.*, 2016, «Giant molecular filaments in the Milky Way. II. The fourth Galactic quadrant», *Astronomy & Astrophysics*, Volume 590, id. A131, 20 pp, DOI:10.1051/0004-6361/201527674
- André, P. *et al.*, 2014, «From Filamentary Networks to Dense Cores in Molecular Clouds: Toward a New Paradigm for Star Formation», *Protostars and Planets VI*, University of Arizona Press, Tucson, p.27-51, DOI: 10.2458/azu_uapress_9780816531240-ch002
- Duarte-Cabral, Ana; Dobbs, C. L., 2017, «The evolution of giant molecular filaments», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 470, Issue 4, p.4261-4273, DOI: 10.1093/mnras/stx1524
- Jackson, James M. *et al.*, 2010, «The Nessie Nebula: Cluster Formation in a Filamentary Infra-red Dark Cloud», *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 719, Issue 2, pp. L185-L189, DOI: 10.1088/2041-8205/719/2/L185
- Syed, J. *et al.*, 2022, «The Maggie filament: Physical properties of a giant atomic cloud», *Astronomy & Astrophysics*, Volume 657, id. A1, 19 pp, DOI: 10.1051/0004-6361/202141265

Jorge Abreu-Vicente es astrofísico e ingeniero en IA, trabajando actualmente en la European Molecular Biology Organization (EMBO) en Heidelberg, Alemania.

