

Intrusos interestelares e impostores: ¿dónde están los meteoritos extrasolares?

Desde 1I/'Oumuamua y 2I/Borisov hasta los meteoros hiperbólicos

Eloy Peña-Asensio, Josep M. Trigo-Rodríguez y Albert Rimola

A pesar del vacío abismal y las distancias colosales entre estrellas, nuestro vecindario cósmico continúa siendo un escenario dinámico, donde nuevos fenómenos desafían el conocimiento actual. Uno de los enigmas más fascinantes es la llegada de objetos provenientes de sistemas planetarios remotos. En este artículo, se realiza una introducción al ámbito de los “intrusos interestelares”, explorando los dos primeros visitantes siderales de gran tamaño, 1I/'Oumuamua y 2I/Borisov. Se abordan, también, aquellos objetos que parecen haber nacido en otras nebulosas solares, pero que, sin embargo, son nativos de nuestro sistema, los denominados “impostores interestelares”. Como ejemplo se muestra el meteorito hiperbólico finlandés que pudo haber sido acelerado por el paso cercano de la estrella Scholz. Además, se explica por qué los meteoroides hiperbólicos detectados por redes de detección de meteoros han sido clasificados sistemáticamente como errores de medida. Por último, se ponen en cuestión las controvertidas afirmaciones sobre el supuesto origen interestelar de las bolas de fuego IM1 e IM2 detectadas por satélites. En definitiva, se pretende dilucidar la siguiente paradoja: ante la creciente evidencia de una población visitante, ¿por qué no hemos hallado ningún meteorito de origen extrasolar?

1. Introducción

En la vasta extensión del medio interestelar, minúsculas partículas sólidas de polvo ejercen su presencia con sutileza, conformando aproximadamente el 1% de la masa presente entre las estrellas. Surgidas en las atmósferas convulsas de estrellas evolucionadas, estas diminutas partículas adquieren dimensiones características en el rango micrométrico. Hasta hace poco, la mera existencia de objetos macroscópicos de procedencia interestelar (aquellos que exceden el tamaño de un metro) permanecía relegada al terreno de la especulación. Sin embargo, con el descubrimiento de 1I/'Oumuamua y 2I/Borisov, dos visitantes interestelares que, pese a su origen remoto, penetraron fortuitamente nuestro sistema solar, hemos comenzado a desvelar una nueva población de “intrusos interestelares”.

Por sus dimensiones notables, 1I/'Oumuamua y 2I/Borisov (fig. 1), parecen haberse originado en discos protoplanetarios densos, donde el polvo cósmico se acumula jerárquicamente para dar origen a nuevos mundos. En este contexto, los embriones planetarios, a medida que crecen, generan movimientos gravitacionales que dispersan planetesimales o cometesimales, algunos de los cuales pueden escapar del dominio estelar. Por lo que sabemos acerca del origen de nuestro

sistema solar y del papel gravitatorio ejercido por los planetas gigantes, la mayor parte de la materia del disco protoplanetario podría proceder de las regiones gélidas exteriores, más allá de la línea de solidificación del agua, que actualmente se encuentra cerca de la órbita de Júpiter. La riqueza en hielo de estos materiales establece un paralelismo entre las propiedades esperadas de los cuerpos interestelares y la naturaleza de los cometas nativos de nuestro sistema solar.

Dentro del sistema solar, los cometas se agrupan en dos familias principales: los Cometas de Período Largo (CPL) y los Cometas de Período Corto (CPC). Los CPC, con órbitas con excentricidades e inclinaciones moderadas, tienen su origen en el Cinturón de Kuiper, una región más lejana que Neptuno bajo el efecto caprichoso de inestabilidades gravitacionales de naturaleza caótica. En contraste, los CPL se manifiestan de manera uniforme desde todas las direcciones, exhibiendo una distribución isotrópica de inclinaciones y destacados semiejes mayores y excentricidades, lo cual concuerda con que provengan de la Nube de Oort.

La tendencia de los CPC (con períodos efímeros de menos de 200 años) a ubicarse en el plano eclíptico implica que estos objetos provienen de una región de origen diferente a la Nube de Oort. Se hipotetizó, por lo tanto, que existía un depósito de objetos helados exterior a Neptuno que proveía a los CPC. Una pequeña fracción de estos objetos transneptunianos sería perturbada gravitacionalmente por los planetas gaseosos externos hacia trayectorias interiores. Esta población transneptuniana se verificó en 1993 con el descubrimiento del primer objeto del cinturón de Kuiper, además de Plutón.

Incluso durante los primeros albores de la formación planetaria, la densidad numérica de objetos imperantes en la Nube de Oort era demasiado baja como para que los cometas

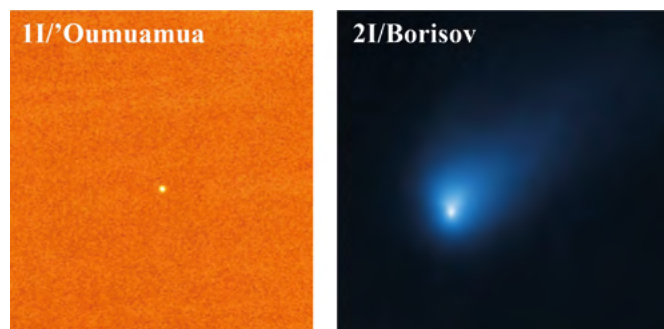


Fig 1. Izquierda: 1I/'Oumuamua observado por el Telescopio Óptico Nórdico el 26 de octubre de 2017. Derecha: 2I/Borisov observado por el Telescopio Espacial Hubble el 12 de octubre de 2019.

naciesen allí [1]. De este modo, los CPL probablemente nacieron en la región ahora ocupada por los planetas gigantes, cuyo crecimiento llevó a la dispersión gravitacional de muchos cometas en órbitas altamente excéntricas e hiperbólicas, conformando un grupo potencial de “impostores interestelares”.

La existencia del cinturón de Kuiper y la Nube de Oort ha llevado a la comprensión de que el sistema solar experimentó un período de migración planetaria. La migración de los planetas gigantes habría esparcido una gran cantidad de objetos a distancias heliocéntricas grandes, poblándose así el cinturón de Kuiper, el denominado disco disperso y la Nube de Oort. Una pequeña parte de esos cometas alterados pudo haber quedado atrapada en órbitas cuasicirculares con perihelios elevados debido a perturbaciones externas de estrellas cercanas y la fuerza de marea galáctica. Con el tiempo, las inclinaciones de estas órbitas atrapadas se aleatorizaron, transformando la distribución inicial en forma de disco a la configuración esferoidal que se cree caracteriza a la Nube de Oort en la actualidad [2]. Por otra parte, muchos CPL fueron expulsados hacia el medio extrasolar en forma de cometas interestelares.

Los descubrimientos fortuitos de 1I/‘Oumuamua y 2I/Borisov prueban la existencia de una población de intrusos extrasolares [3]. Estas reliquias interestelares despiertan un renovado fervor por comprender la naturaleza y el origen de estos huéspedes cósmicos, visitantes siderales que nos acompañan temporalmente ofreciendo información sobre sistemas estelares remotos.

2. 1I/‘Oumuamua

El primer objeto interestelar oficialmente confirmado (anteriormente C/2017 U1) fue detectado el 19 de octubre de 2017 por Robert Weryk desde la cumbre de Haleakalā en Maui, Hawái, con el telescopio Pan-STARRS1 [4]. Su órbita resultó ser hiperbólica, con excentricidad $e = 1.201$ y una inclinación retrógrada $i = 122.8^\circ$. El paso cercano de 1I/‘Oumuamua a la Tierra, a solo 0.16 au de nuestra órbita tres días antes de su detección inicial, sugiere la existencia de una población inadvertida de objetos similares con geometrías de observación menos favorables. 1I/‘Oumuamua apareció como un punto, incluso para los telescopios de gran tamaño.

Dos meses y medio de observaciones permitieron determinar con precisión su órbita, revelando una aceleración no gravitacional inesperada. A pesar de que no se detectó desgasificación ni pérdida material en los datos ópticos, se determinó como dominante una aceleración radial en dirección contraria al Sol. El radio efectivo calculado de 1I/‘Oumuamua se sitúa en un intervalo de 55 m a 114 m [5].

Las observaciones fotométricas mostraron que 1I/‘Oumuamua tenía una amplitud de curva de luz extrema correspondiente con un factor de 10 en brillo y un período estable cercano a 8 horas. La curva de luz en los cuerpos sin atmósfera

del sistema solar es causada por formas azimutales o variaciones en el albedo superficial moduladas por la rotación. La relación entre sus ejes fue inicialmente calculada en 10:1. Cálculos posteriores indicaron que la forma más probable de 1I/‘Oumuamua era un elipsoide oblató 6:6:1 [6], en contraposición a la geometría prolada 6:1:1 popularizada en las impresiones artísticas.

Las posibles fuentes de la aceleración no gravitacional incluyeron sublimación de hielos volátiles como hidrógeno sólido, nitrógeno o monóxido de carbono. No obstante, estas propuestas requieren composiciones en el lugar de origen de 1I/‘Oumuamua que difieren considerablemente de lo esperado. En última instancia, se sugirió que su aceleración podría deberse a la liberación de hidrógeno molecular atrapado [7], el cual se habría formado a través del procesamiento energético de un cuerpo helado rico en agua. 1I/‘Oumuamua sería un planetesimal helado que experimentó irradiación a bajas temperaturas por rayos cósmicos durante su travesía interestelar y desgasificación por calentamiento a medida que se aproximaba a nuestro sistema solar, pasando desapercibida a los espectroscopios que lo observaron.

Resultó particularmente desconcertante que no se detectara ningún rastro de coma polvoriento similar a la de los cometas, incluso en las imágenes más detalladas. Este margen de incertidumbre ha dado lugar a propuestas poco convencionales. La presión de radiación plantea una interpretación radicalmente diferente de la aceleración no gravitacional en 1I/‘Oumuamua. Esto requeriría de una estructura extremadamente porosa y mucho menos densa que el aire para explicar su movimiento observado. De aquí que hayan surgido otros planteamientos aún más “exóticos” que consideran la posibilidad de que 1I/‘Oumuamua sea una estructura manufacturada por una civilización alienígena, como una vela solar muy delgada [8].

3. 2I/Borisov

El segundo intruso interestelar conocido, 2I/Borisov (también llamado C/2019 Q4), fue descubierta el 30 de agosto de 2019. Esta observación fue realizada por Gennadiy Borisov, quien empleó un telescopio de 0.65 m de propia construcción para apuntar a una región del cielo poco explorada por otros telescopios. Su órbita, con una inclinación de $i = 44.05^\circ$, se caracteriza por ser muy hiperbólica, con una excentricidad $e = 3.358$, lo que apunta a un origen interestelar. Fue avistado aproximadamente tres meses antes de su llegada gracias a la coma luminosa de polvo que lo rodeaba. Este temprano avistamiento y su brillo intrínseco permitió su observación durante aproximadamente un año, en contraste con 1I/‘Oumuamua, que desapareció del campo de detección en pocos meses.

En un período de 10 meses, se obtuvo una serie de mediciones astrométricas que revelaron la

existencia de una aceleración no gravitacional con la componente radial predominante. A diferencia de 1I/'Oumuamua, la aceleración no gravitacional de 2I/Borisov coincidió con una clara y continua pérdida de masa y su naturaleza no plantea ningún enigma. Pese a que la coma brillante impidió la detección directa del núcleo de 2I/Borisov, se pudo estimar que el radio del núcleo estaría en el rango de 0.2 y 0.5 km [9].

2I/Borisov presentó una actividad cometaria evidente en forma de una extensa coma de polvo. Su espectro mostró bandas de emisión de gas distintivas que se destacaban en su fondo de polvo, correspondientes a las características de fluorescencia de resonancia observadas en cometas de período corto y largo. La alta abundancia de monóxido de carbono (CO) en 2I/Borisov sugiere que se formó en condiciones frías, posiblemente en las regiones externas de un disco protoplanetario, y mantuvo estas bajas temperaturas desde su formación para evitar la sublimación del CO [10]. Que se originase a una distancia considerable de su estrella también explicaría su mayor facilidad para desligarse gravitacionalmente de su sistema progenitor.

Existe una pequeña probabilidad de que los cometas de nuestra propia Nube de Oort sean dispersados en órbitas hiperbólicas debido a interacciones con estrellas pasantes y objetos subestelares, como enanas marrones flotantes o planetas errantes. Este es el caso arquetípico de los impostores interestelares: cometas expulsados de la Nube de Oort que pasan por la región planetaria y pueden ser confundidos con intrusos interestelares procedentes de otras nebulosas solares. Ejemplo de ello es el recientemente descubierto cometa Nishimura (C/2023 P1), el cual se estimó inicialmente que viajaba en una órbita hiperbólica, pero el refinamiento de los cálculos a los pocos días demostró que en realidad seguía una trayectoria elíptica muy excéntrica. Aproximadamente el 0,1 % de los objetos con órbitas similares a la de 1I/'Oumuamua y el 0,01 % de aquellos con órbitas similares a 2I/Borisov podrían ser en realidad cometas nativos de nuestro sistema solar [11].

4. Meteoros interestelares

A principios del siglo xx, el campo de la ciencia de los meteoros (los más brillantes son llamados bolas de fuego o bólidos si superan la magnitud del planeta Venus) se vio inmerso en el debate sobre si estos fenómenos luminosos tenían una naturaleza interestelar o interplanetaria. Esta controversia surgió debido a la considerable cantidad de meteoroides hiperbólicos detectados en registros fotográficos en el rango óptico.

Dada la tecnología actual, se espera que cualquier conjunto de observaciones contenga meteoros asociados a órbitas hiperbólicas debido a la incertidumbre en la estimación de la velocidad inicial. Este resultado es predecible y completamen-

te normal, siendo una consecuencia inherente de los errores que surgen tanto de los dispositivos de medida como del método utilizado para extraer información durante la entrada atmosférica a hipervelocidad. El porcentaje de objetos aparentemente hiperbólicos en una base de datos de órbitas de meteoros refleja realmente la precisión proporcionada por la misma [12].

Programas de observación recientes no han logrado identificar pruebas convincentes de una población claramente hiperbólica en tamaños de milímetros a centímetros. En realidad, se ha observado una correlación fuerte entre las excentricidades hiperbólicas y la geometría de incidencia [13]. Esto significa que los objetos que impactan en contradirección al ápex de la Tierra, resultando en velocidades aparentes más altas, tienden a mostrar un mayor porcentaje de órbitas hiperbólicas. Lo cual tiene sentido, ya que la precisión de medida de los meteoros más veloces suele ser menor. Además, se ha notado que la mayoría de los eventos categorizados como hiperbólicos se encuentran cerca de la eclíptica, en contraposición a la distribución aleatoria que cabría esperar. Una vez más, esto sugiere que solo los eventos en el plano de movimiento de la Tierra son más propensos a tener mayores errores de medida al impactar de frente a más velocidad relativa y, por ende, más probabilidad de ser clasificados como hiperbólicos.

La distinción entre una órbita elíptica de alta excentricidad y una órbita hiperbólica puede llegar a ser marginal. Consideremos un objeto proveniente del límite exterior de nuestro sistema solar. Su velocidad medida como meteoro en la atmósfera terrestre será alta, varias decenas de kilómetros por segundo. Ahora bien, si contemplamos el impacto contra la Tierra de un objeto interestelar con una velocidad cercana a cero en el infinito, podría presentar una velocidad solamente de unos cientos de metros por segundo mayor que el primer caso.

Ejemplo de ello es el meteoroides FH1 que sobrevoló Finlandia el 23 de octubre de 2023 en una trayectoria hiperbólica casi paralela a la superficie terrestre. Su velocidad al impactar contra la atmósfera era tan solo 700 m/s mayor que la máxima esperada para una órbita elíptica. Sin embargo, su inclinación orbital coincidente con la eclíptica lo delataba: debía tratarse de un cuerpo acelerado del sistema solar. Nuestros cálculos reflejan la posibilidad de que FH1 esté relacionado con el paso cercano del sistema estelar binario Scholz, el cual atravesó la Nube de Oort hace 80.000 años perturbando la población de objetos que se encontraba a su paso [14].

Sorprendentemente, hace apenas unos años, se proclamaron las dos primeras detecciones de meteoros interestelares a partir de los destellos observados por los sensores satelitales del Departamento de Defensa de Estados Unidos y publicados en el sitio web del Centro para el Center for Near-Earth Object Studies (CNEOS) de la NASA-JPL: los deno-

minados IM1 e IM2 [15], este último habiendo sido identificado primero por nuestro grupo [16]. Sin embargo, su verificación resulta imposible, ya que no se puede llevar a cabo un análisis independiente de los datos originales debido a que provienen de sensores gubernamentales clasificados. Aun así, y sin facilitar los datos en bruto, un comunicado oficial del Comando Espacial de EE. UU. confirmó con un 99.999% de confianza que el IM1 era interestelar.

Precisamente, este evento meteórico, producido por un objeto de unos 500 kilogramos y un tamaño aproximado de medio metro, tuvo lugar el 8 de enero de 2014. La bola de fuego que generó fue detectada cerca de la costa noreste de Papúa Nueva Guinea. Con una velocidad asintótica de 42 km/s y una explosión a 18.7 km de altura, se derivó que la resistencia dinámica del material de IM1 era más de dos veces superior a la de los meteoritos de hierro conocidos [16]. Además, su órbita heliocéntrica presentaba una inclinación de 10° .

Por otro lado, la detección del bólido IM2 se efectuó el 9 de marzo de 2017 a una altitud de 23 km sobre el océano Atlántico, cerca de Portugal. Tenía una dimensión de aproximadamente un metro y su masa era diez veces mayor que la de IM1. Aunque su resistencia no alcanzaba los mismos niveles de IM1, aún presentaba un valor inusualmente alto, ubicándose como la tercera mayor en el catálogo del CNEOS. IM2 entró en el sistema solar con una velocidad en el infinito de 26 km/s y una inclinación orbital de 24° .

Es evidente que IM1 e IM2 presentan un sesgo hacia resistencias altas, lo que podría indicar que solo objetos lo suficientemente robustos pueden sobrevivir al duro entorno interestelar. No obstante, la resistencia dinámica se calcula multiplicando la presión del aire por la velocidad al cuadrado del meteorito en el pico de radiación de energía [17, 18]. Por lo tanto, una sobreestimación de la velocidad puede proporcionar valores anormalmente elevados de resistencia.

Las inclinaciones orbitales sospechosamente bajas (típicas de objetos de nuestro sistema solar) de estos dos eventos, 10° y 24° , contrastan con las de 1I/'Oumuamua y 2I/Borisov, -57.2° y 44.05° , acercándose estas últimas mucho más al valor esperado para una población isotrópica [14].

Los modelos teóricos actuales revelan que es posible ajustar la curva de luz observada y el avance en altura de IM1 asumiendo velocidades bajas si se utilizan parámetros físicos típicos de cuerpos condriticos [19]. En este sentido, la velocidad reportada por CNEOS solo podría ser coherente con una eficiencia luminosa excepcionalmente baja, una forma extremadamente aerodinámica y un material de alta resistencia. La composición férrica quedaría descartada, dado que la ablación del hierro ocurre a través de la fusión (en lugar de la vaporización, como en el caso de los objetos condriticos), lo cual resulta en un brillo excesivamente alto que no con-

cuerda con la fotometría del meteorito. Aun así, existen discrepancias con las medidas realizadas por una estación de infrasonidos, lo que le confiere a este evento un carácter aún más excepcional.

En el análisis comparativo de los eventos de CNEOS con observaciones independientes desde estaciones de detección en tierra se han identificado grandes diferencias en la determinación de las velocidades, de 10-15 km/s, y una marcada variabilidad en la precisión del radiante, con errores promedio que exceden los 10° . Dada esta serie de circunstancias y la ausencia de la información completa sobre las detecciones de IM1 e IM2, resulta inviable afirmar de manera definitiva el origen extrasolar de ninguno de los dos.

La medición de objetos más pequeños en órbitas hiperbólicas utilizando radares tampoco está exenta de controversia [5]. Hubo afirmaciones sobre la detección de objetos interestelares con tamaños en el rango de decenas de micrones utilizando el Advanced Meteor Orbit Radar (AMOR), aunque este resultado posteriormente fue cuestionado. El Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR) se utilizó para buscar proyectiles hiperbólicos de tamaños del orden de varios cientos de micrones y solo se encontraron unas pocas detecciones entre millones de órbitas, que se atribuyeron a errores de medición. El radar de Arecibo también detectó impactos en la atmósfera causados por partículas aparentemente de origen interestelar. Adicionalmente, se reportaron detecciones de polvo interestelar *in situ* a partir de observaciones de las sondas espaciales Galileo y Ulysses [20]. La figura 2 muestra las estimaciones actuales del flujo de intrusos interestelares según su radio.

5. ¿Por qué no hemos hallado ningún meteorito de origen extrasolar?

2I/Borisov fue descubierto como parte de un sondeo cerca del Sol, cuya profundidad y cobertura no han sido publicadas, lo que imposibilita utilizarlo para calcular el flujo de esta población. La detección de 1I/'Oumuamua en el sondeo del cielo de Pan-STARRS, que está bien caracterizado, permite calcular la densidad numérica galáctica de objetos análogos. La cifra actual se sitúa en 0.1 au^{-3} [21]. Esto se traduce aproximadamente en unos 10^4 objetos similares más cercanos al Sol que Neptuno en cualquier momento. Con un tiempo medio para cruzar el sistema solar de cerca de 10 años, el flujo de intrusos hacia la región planetaria es sumamente alto, alrededor de 10^3 al año, equivalente a 3 por día.

Si un cuerpo entrase en el sistema solar con una velocidad prácticamente nula en el infinito, experimentaría una aceleración hasta alcanzar los 42 km/s a una distancia de 1 ua del Sol. En caso de choque directo con nuestro planeta, dado que la velocidad orbital terrestre es de 30 km/s, esto resultaría en una colisión a 72 km/s, que se encuentra en el rango superior observado para los meteoros de naturaleza cometaria con órbitas altamente excén-

tricas. Cabe destacar que se espera que la mitad de los objetos interestelares ingresen al sistema solar con velocidades en el infinito superiores a 40 km/s, lo que fácilmente podría producir impactos contra la Tierra por encima de los 100 km/s [22].

Los objetos de gran tamaño provenientes del espacio interestelar podrían eventualmente colisionar con nuestro planeta, pero debido a sus altas velocidades de impacto, es menos probable que lleguen a depositar meteoritos en la superficie en comparación con los asteroides de nuestro sistema solar. De acuerdo con la tasa de impacto calculada para objetos interestelares de unos 100 metros de diámetro en nuestro planeta, se estima que habrían ocurrido menos de 50 eventos de esta magnitud a lo largo de la historia terrestre [23]. Este cálculo es 10^4 veces inferior a la tasa de impacto que experimentan rocas de origen asteroidal de tamaño similar.

Es posible que estos eventos hayan culminado en explosiones aéreas en la atmósfera, debido tanto a sus elevadas velocidades como a su estructura frágil, que en su mayoría sería de naturaleza cometary. En consecuencia, parece poco probable que encontremos evidencia de cráteres originados por proyectiles interestelares o de meteoritos de origen extrasolar en nuestras colecciones. El flujo de la población de tamaño métrico se encuentra aún por esclarecer y, tal vez, no sepamos o no podamos distinguir sus restos de los meteoritos originarios de nuestra nebulosa solar. No obstante, el conocimiento actual, en particular la hipótesis nebular, sugiere que la firma isotópica en sus materiales formativos sería un indicador inequívoco [24].

Ante el anuncio del supuesto hallazgo de restos de origen interestelar de IM1 durante una expedición marítima [25], cabría destacar varios puntos. Para poder respaldar dicha afirmación sobre la naturaleza extrasolar de las esferas milimétricas encontradas a una profundidad de 2 km al norte de la isla Manus, es necesario demostrar: 1) que el evento IM1 fue causado por un objeto proveniente de otro sistema planetario y que no se desintegró por completo al ingresar a nuestra atmósfera, 2) que los restos de IM1 estaban concentrados en el área de búsqueda y que las esferas recogidas tienen una relación directa con el evento IM1 y 3) que estas esferas poseen una composición isotópica anómala que indica un origen en otro sistema planetario. Los dos últimos puntos parecen difíciles de demostrar. De hecho, las anomalías químicas encontradas ya han sido descritas previamente en micrometeoritos originados en nuestro sistema planetario [26]. Además, esa región experimenta la reentrada de satélites artificiales que, en efecto, podrían generar residuos de materiales refractarios compuestos. Estos residuos, al fundirse, pueden presentar concentraciones inusuales de elementos químicos, como las descritas por el equipo de Avi Loeb [27].

Hasta el momento ninguno de estos puntos clave ha sido confirmado, lo que sugiere que, si los

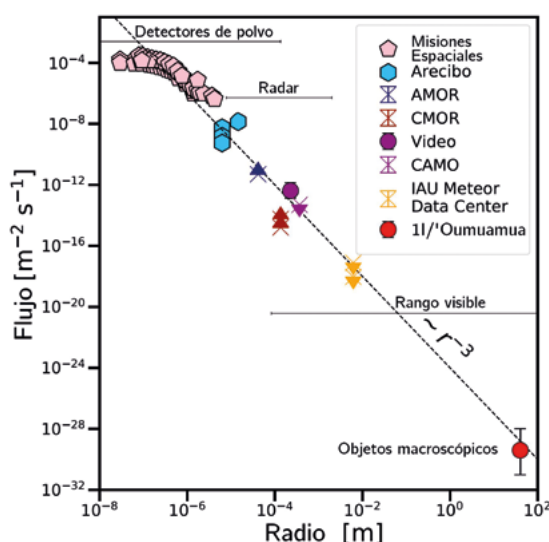


Fig 2. Estimación observacional del flujo de intrusos interestelares en función de su tamaño. Adaptada de [5].

materiales recuperados tienen un origen natural, son micrometeoritos comunes procedentes de asteroides de nuestro sistema solar que han estado interactuando con el agua marina durante un largo período de tiempo [28].

No cabe duda de la fascinación que provocan los intrusos interestelares, evidenciada por la amplia cobertura mediática que a menudo reciben investigaciones no arbitradas con afirmaciones apresuradas. Debemos mantener la cautela necesaria para no dejarnos deslumbrar por impostores (interestelares) que puedan confundir nuestros análisis.

Si bien anhelamos la posibilidad de hallar un auténtico meteorito de origen extrasolar, es fundamental afrontar esta búsqueda con rigor científico. Por ello, tal vez lo más sensato sea planificar una misión espacial lista para ser lanzada tras la próxima detección, equipada para recolectar y retornar consigo valiosas muestras que pudieran desvelar los enigmas de estos visitantes interestelares y sus sistemas estelares de procedencia. Mientras, desde la Red de Investigación sobre Bóridos y Meteoritos del CSIC [29], seguiremos observando el cielo y registrando todos sus fenómenos con enorme curiosidad.

Referencias

- [1] R. GOMES, H. F. LEVISON, K. TSIGANIS y A. MORBIDELLI, "Origin of the Cataclysmic Late Heavy Bombardment Period of the Terrestrial Planets", *Nature* **435**(7041), 466-469 (2005).
- [2] L. DONES, R. BRASSER, N. KAIB, y H. RICKMAN "Origin and Evolution of the Cometary Reservoirs", *Space Science Reviews* **197**, 191-269 (2015).
- [3] D. Z. SELIGMAN y A. MORO-MARTÍN, "Interstellar Objects", *Contemporary Physics* **63**(3), 200-232 (2022).
- [4] G. V. WILLIAMS, H. SATO, K. SARNECZKY, R. WAINSCOAT, D. WOODWORTH y K. MEECH, "Minor Planets 2017 SN₃₃ and 2017 U1", *Central Bureau Electronic Telegrams* 4450, 1 (2017).
- [5] D. JEWITT, y D. Z. SELIGMAN, "The Interstellar Interlopers", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **61**, 197-236 (2023).

- [6] S. MASHCHENKO, "Modelling the Light Curve of 'Oumuamua: Evidence for Torque and Disc-Like Shape", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **489**(3), 3003-3021 (2019).
- [7] J. B. BERGNER y D. Z. SELIGMAN, "Acceleration of 11/'Oumuamua from Radiolytically Produced H₂ in H₂O ice", *Nature* **615**(7953), 610-613 (2023).
- [8] S. BIALY y A. LOEB, "Could Solar Radiation Pressure Explain 'Oumuamua's Peculiar Acceleration?", *The Astrophysical Journal Letters* **868**(1), L1 (2018).
- [9] D. JEWITT y J. LUU, "Initial Characterization of Interstellar Comet 21/2019 Q4 (Borisov)", *The Astrophysical Journal Letters* **886**(2), L29 (2019).
- [10] E. M. PRICE, L. I. CLEEVES, D. BODEWITS y K. I. ÖBERG, "Ice-coated Pebble Drift as a Possible Explanation for Peculiar Cometary CO/H₂O Ratios", *The Astrophysical Journal* **913**(1), 9 (2021).
- [11] A. HIGUCHI y E. KOKUBO, "Hyperbolic Orbits in the Solar System: Interstellar Origin or Perturbed Oort Cloud Comets?", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **492**(1), 268-275 (2020).
- [12] M. HAJDUKOVÁ Jr., P. KOTEN, L. KORNOŠ y J. TÓTH, "Meteoroid Orbits from Video Meteors. The Case of the Geminid Stream", *Planetary and Space Science* **143**, 89-98 (2017).
- [13] M. HAJDUKOVA, V. STERKEN, P. WIEGERT y L. KORNOŠ, "The Challenge of Identifying Interstellar Meteors", *Planetary and Space Science* **192**, 105060 (2020).
- [14] E. PEÑA-ASENSIO, J. VISURI, J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ, H. SOCAS-NAVARRO, M. GRITSEVICH, M. SILJAMA, y A. RIMOLA, "Oort Cloud Perturbations as a Source of Hyperbolic Earth Impactors", *Icarus* (en prensa) <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.12673>
- [15] A. SIRAJ y A. LOEB, "A Meteor of Apparent Interstellar Origin in the CNEOS Fireball Catalog", *The Astrophysical Journal* **939**(1), 53 (2022a).
- [16] E. PEÑA-ASENSIO, J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ y A. RIMOLA, "Orbital Characterization of Superbolides Observed From Space: Dynamical Association with Near-Earth Objects, Meteoroid Streams, and Identification of Hyperbolic Meteoroids", *The Astronomical Journal* **164**(3), 76 (2022).
- [17] J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ y J. LLORCA, "The Strength of Cometary Meteoroids: Clues to the Structure and Evolution of Comets", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **372**(2), 655-660 (2006).
- [18] J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ y J. LLORCA, "Erratum: The Strength of Cometary Meteoroids: Clues to the Structure and Evolution of Comets", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **375**(1), 415-415 (2007).
- [19] P. G. BROWN y J. BOROVIČKA, "On the Proposed Interstellar Origin of the USG 20140108 Fireball", *The Astrophysical Journal* **953**(2), 167 (2023).
- [20] M. BAGUHL, E. GRÜN y M. LANDGRAF, "In situ Measurements of Interstellar Dust with the Ulysses and Galileo Spaceprobes", *Space Science Reviews* **78**, 165-172 (1996).
- [21] D. JEWITT, J. LUU, J. RAJAGOPAL, R. KOTULLA, S. RIDGWAY, W. LIU y T. AUGUSTEIJN, "Interstellar Interloper 11/2017 U1: Observations from the NOT and WIYN Telescopes", *The Astrophysical Journal Letters* **850**(2), L36 (2017).
- [22] T. M. EUBANKS, A. M. HEIN, M. LINGAM, A. HIBBERD, D. FRIES, P. PERAKIS, R. G. KENNEDY III, W. P. BLASE y J. SCHNEIDER, "Interstellar Objects in the Solar System: 1. Isotropic Kinematics from the Gaia Early Data Release 3", *arXiv preprint arXiv:2103.03289*.
- [23] D. JEWITT, M. T. HUI, Y. KIM, M. MUTCHLER, H. WEAVER y J. AGARWAL, "The Nucleus of Interstellar Comet 21/Borisov", *The Astrophysical Journal Letters* **888**(2), L23 (2020).
- [24] J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ, "El origen del Sistema Solar revelado del estudio de meteoritos primitivos y partículas cometarias", *Revista Iberoamericana de Física* **6**, 34-40 (2010).
- [25] A. LOEB *et al.*, "Discovery of Spherules of Likely Extrasolar Composition in the Pacific Ocean Site of the CNEOS 2014-01-08 (IM1) Bolide", *arXiv preprint arXiv:2308.15623* (2023).
- [26] N. G. RUDRASWAMI, M. SHYAM PRASAD, E. V. S. S. K. BABU y T. VIJAYA KUMAR, "Major and Trace Element Geochemistry of S-type Cosmic Spherules", *Meteoritics & Planetary Science* **51**(4), 718-742 (2016).
- [27] M. MORENO-IBÁÑEZ, J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ, M. MARTÍNEZ-JIMÉNEZ, J. ALONSO-AZCÁRATE, M. AMBLÀS y P. PUJOLS, "Vic Meteor-Wrong: An Unexpected Sulfur/Carbon Rocket Composite Fall", *47th Annual Lunar and Planetary Science Conference 1903*, 1430 (2016, March).
- [28] S. J. DESCH, A. P. JACKSON y H. E. HARTNETT, "The Challenges of Recovering Interstellar Meteorites", *Asteroids, Comets, Meteors Conference 2023*, LPI Contrib. No. 2851 (2023).
- [29] E. PEÑA-ASENSIO, J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ y A. RIMOLA, "Análisis automático de bólidos productores de meteoritos y reentradas atmosféricas. Nuevo software de la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos", *Revista Española de Física* **36**(1), 15-20 (2022).

Eloy Peña-Asensio
Universitat Autònoma de Barcelona
(UAB)
Institut de Ciències de l'Espai
(ICE, CSIC)



Josep M. Trigo-Rodríguez
Institut de Ciències de l'Espai
(ICE, CSIC)
Institut d'Estudis Espacials
de Catalunya (IEEC)



Albert Rimola
Universitat Autònoma de Barcelona
(UAB)

