

MISTERIO EN JÚPITER

Alberto Flandes

El estudio de los haces de polvo y del polvo interplanetario y cósmico en general es la base de una nueva rama de los estudios espaciales llamada astronomía de polvo. Esta nueva disciplina extrae información del análisis de los granos de polvo, que para efectos prácticos, como los fotones de la radiación electromagnética, son mensajeros cósmicos.

EL 6 DE OCTUBRE de 1990 el transbordador Atlantis despegó de Cabo Cañaveral. En el compartimento de carga llevaba la sonda espacial *Ulyses*, una misión conjunta de la Agencia Espacial Europea y la NASA. Esta sonda fue la primera en ponerse en órbita perpendicular al plano del Sistema Solar, lo que le permitiría estudiar directamente los polos solares. Para alcanzar esta órbita atípica fue necesario dirigirla primero a Júpiter, el planeta gigante de nuestro Sistema Solar, cuya intensa gravedad serviría para desviar la sonda en la dirección deseada. La nave *Ulyses* llevaba 12 instrumentos de exploración científica, entre ellos detectores de partículas de bajas, altas y muy altas energías; detectores de partículas de polvo interplanetario y estelar, y un magnetómetro para medir el campo magnético del Sol.

La falda de polvo de Júpiter.

De las fumarolas volcánicas de Io salen partículas de polvo que se aceleran a grandes velocidades y escapan en espirales del sistema joviano.



Nota: Las proporciones entre Júpiter, Io y el toro de plasma no son reales. La falda es muy tenue y no es observable directamente.

Ilustración: Alberto Flandres

Cuando la sonda se encontraba aún lejos de Júpiter, a una distancia de alrededor de una unidad astronómica (1 UA = 150 millones de kilómetros, igual a la distancia promedio entre la Tierra y el Sol), el detector de polvo empezó a percibir algo anormal: ráfagas de partículas de polvo que viajaban a muy alta velocidad y que sobrecargaban por momentos el instrumento. El detector se había calibrado para velocidades de 50 km/s, superiores, según se pensaba, a las velocidades típicas del polvo interplanetario común, que son de apenas 10 km/s; pero estos granos de materia parecían moverse varias veces más rápido.

Estas ráfagas periódicas se distribuían, al parecer, en haces que envolvían a Júpiter como los chorros espirales de un aspersor de jardín, y que bañaban la sonda por intervalos que iban de dos a varios días. La emisión parecía concentrarse en el plano ecuatorial del planeta, pero a distancias mayores del planeta el polvo se apartaba del plano ecuatorial y ondulaba verticalmente por encima y por debajo de este plano. Este fenómeno llegó a conocerse como *los haces de polvo jovianos* por algunos científicos espaciales y como *la falda de bailarina de Júpiter* por otros.

¿Qué mecanismo podía producir partículas de polvo tan energéticas como para vencer el campo gravitacional de un planeta gigante como Júpiter, cuya masa es 300 veces mayor que la de la Tierra? ¿De dónde venían estas partículas, de tamaños de frac-

ciones de micra (milésimas de milímetro), casi como partículas de humo de cigarro?

En busca de la fuente

Al buscar la procedencia de este flujo de polvo, se pensó en dos posibles fuentes *jovianas*, la primera, aparentemente obvia, los anillos de polvo de Júpiter, y la segunda el llamado toro de plasma.

Júpiter posee cuatro anillos principales compuestos de partículas de polvo micro-métricas: un halo con forma de dona (o *toro*, en lenguaje matemático), un anillo principal muy plano y delgado, y dos anillos tenues externos. Este sistema completo de anillos se extiende radialmente quizá más de 200 000 km, desde los 92 000 km, medidos desde el centro de Júpiter hasta más allá de los 300 000. Por conveniencia, las distancias en escalas planetarias se expresan en *radios planetarios*. Así, $1R_J$, o un radio joviano, es igual a unos 71 492 km. Usando estas unidades se obtiene una mejor idea de las proporciones de los anillos. Éstos se extienden de $1.29 R_J$ a más allá de los $4 R_J$.

El toro de plasma es una estructura polvosa mucho más compleja que los anillos jovianos. Tiene forma de dona y es una sopa de núcleos de átomos, protones, electrones y polvo, que rodea Júpiter a la altura de la órbita de Io, una de las cuatro lunas que Galileo Galilei le descubrió a Júpiter a principios del siglo XVII. Io orbita a unos seis radios jovianos. Este satélite acaparó la atención de los astrónomos en

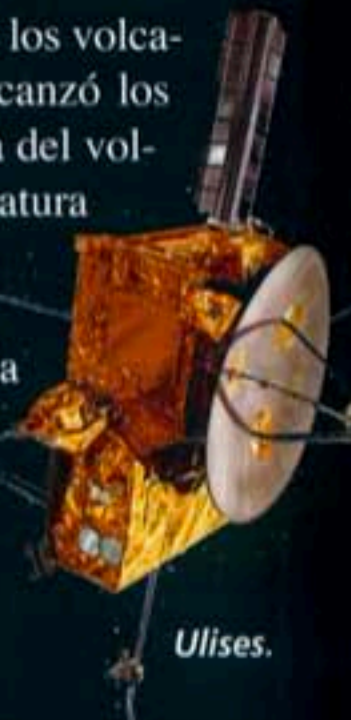
1979, cuando la sonda *Viajero 1* descubrió volcanes activos en su superficie.

Galileo va a Júpiter

Un año antes de la partida de *Ulises* se había lanzado otra sonda, *Galileo*, para explorar el sistema joviano. *Galileo* no llegó a Júpiter hasta diciembre de 1995, tres años después de la primera aproximación de *Ulises*. Esto se debió a que *Galileo* fue primero a Venus y luego pasó por la Tierra antes de emprender el viaje al planeta gigante. La llegada de una nueva sonda proporcionaría a los científicos espaciales más datos que ayudarían, entre otras cosas, a resolver el enigma de los haces de polvo. A diferencia de *Ulises*, que sólo pasó de largo, *Galileo* se quedó en órbita alrededor de Júpiter y Io estudió con gran detalle a diferentes distancias; hizo vuelos cercanos a sus lunas y cruzó sus anillos de polvo y su toro de plasma. La misión *Galileo* fue muy exitosa por la gran cantidad de nuevos datos e imágenes que aportó. A partir de estos nuevos datos y mediciones se intentó definir de una vez por todas la fuente del polvo por dos caminos opuestos, pero complementarios: reconstruir la trayectoria de las partículas individuales desde el detector hasta Júpiter y suponer diversas fuentes y explorar las trayectorias posibles que las partículas de polvo seguirían si pudieran escapar. Los resultados no dejaban duda: la fuente era el toro de plasma, y en particular la luna Io.

La furia de Io

Io es 4% mayor que nuestra luna y está cubierto de volcanes cuyas erupciones son más espectaculares que las de cualquier volcán de la Tierra. Los volcanes de Io lanzan gases y polvo con una velocidad de hasta de 1 km/s y una altura de por lo menos 50 km. He aquí dos récords que nos hablan de la violencia de la actividad volcánica en Io: durante una erupción del volcán Pele, llamado así en honor de la diosa hawaiana de los volcanes, el material expulsado alcanzó los 460 km de altura, y en otra del volcán Pillan llegó a una temperatura de 2 600 kelvin, es decir, unos 2 300°C. Incluso considerando la baja gravedad de Io (seis veces más débil que la de la Tierra), el vulcanismo en ese satélite es sorprendente y se explica



Ulises.

Breve historia

- 1979 Las imágenes de las sondas *Viajero* revelan los volcanes de Io.
- 1992 Los detectores de polvo de la nave *Ulises* permiten descubrir los haces de polvo de Júpiter. Estos detectores fueron desarrollados en el Instituto Max Planck de Heidelberg, Alemania, por el equipo de Eberhard Gruen y Hugo Fechtig.
- 1993-1995 E. Gruen, el húngaro M. Horányi, el hindú A. Mendis, la mexicana D. Maravilla y los estadounidenses M. Burns y D. Hamilton especulan sobre el origen del polvo: ¿los anillos de Júpiter o la luna Io?
- 1993 El estadounidense D. Hamilton y E. Gruen sugieren que los haces se forman por interacción entre el polvo expulsado por Io y el campo magnético interplanetario.
- 1994 H. Zook, estadounidense, estima las velocidades y los tamaños de los granos de polvo de los haces.
- 1995 La sonda *Galileo* confirma la existencia de los haces con un detector gemelo de la nave *Ulises*.
- 1996-2000 W. Ip y A. Graps demuestran que Io es la fuente del polvo.
- 2003-2004 A. Flandes y D. Maravilla, de la UNAM, desarrollan modelos matemáticos para explicar la evolución del polvo desde su origen hasta la detección.
- 2005 Los alemanes E. Gruen, S. Kempf, R. Srama y S. Postberg confirman la existencia de los haces de polvo de Saturno con datos de la sonda *Cassini*.
- 2005 Kempf y paralelamente A. Flandes y D. Maravilla proponen las posibles fuentes del polvo de Saturno.
- 2005-2006 A. Flandes y H. Krueger demuestran la importancia del viento solar en la formación de los haces de polvo de Júpiter y Saturno.

por la estratégica posición de su órbita entre Júpiter y sus otras tres lunas mayores (Europa, Ganímedes y Calixto). Entre los cuatro estrujan y estiran gravitacionalmente a Io, calentando su interior hasta el punto de fusión.

Las emisiones volcánicas de Io generan una delgada atmósfera de gas y polvo, y a lo largo del tiempo también han formado el toro de plasma. El plasma es un tipo especial de fluido de baja densidad compuesto de partículas cargadas eléctricamente. La carga hace que las partículas interactúen, reaccionando a la presencia y al movimiento de las demás sin que haya contacto entre ellas. En un fluido común, en cambio, las partículas no son afectadas por el movimiento o la presencia de sus compañeras hasta que chocan unas con otras. En la Tierra los plasmas son raros, pero cerca del 99% de la materia que vemos en el Universo está en estado de plasma.

El entorno de Júpiter también está lleno de plasma, pero el toro de Io se distingue del plasma de fondo por ser más denso y mucho más caliente, así como por su composición, en la que predominan el azufre, el oxígeno y el sodio, con algo de cloro. La carga eléctrica también hace que las partículas del toro de plasma sientan el intenso campo magnético de Júpiter, de modo que el toro completo es arrastrado por este campo y gira al mismo ritmo que el planeta.

El toro de plasma es el segundo escalón en el proceso de fuga de las partículas de polvo. El primero son las eyecciones volcánicas. Las finas partículas de polvo provenientes de las eyecciones que logran alcanzar las partes más altas de las fumarolas son inyectadas automáticamente en el toro, donde se cargan eléctricamente en cuestión de segundos; por ejemplo, al capturar los electrones o los iones libres del plasma que chocan sobre su superficie, o al perder sus propios electrones o hasta iones en choques muy violentos. También puede suceder (aunque se trata un efecto secundario en este ambiente) que las partículas de polvo pierdan electrones al absorber éstos energía de la radiación ultravioleta del Sol y desprenderse de sus partículas.

Como el plasma del toro se mueve al mismo ritmo que Júpiter —una revolución cada 10 horas—, es unas cuatro veces más rápido que Io, que tarda 42 horas en completar su órbita. Como Io está inmersa en

el toro, el movimiento relativo del plasma la afecta como un viento de más 50 km/s que se lleva las partículas de polvo cargadas y las moléculas ionizadas de las copas de las fumarolas volcánicas. Dentro del toro, estas partículas de polvo se diseminan alrededor de Júpiter junto con el plasma, pero sólo

una fracción alcanza en su fuga el medio interplanetario.

Electromagnetismo contra gravitación

De los ocho planetas del Sistema Solar, seis tienen campo magnético propio y Júpiter posee el más intenso de todos. Los campos magnéticos de los planetas se originan en su movimiento de rotación y en el movimiento del material del interior, que es conductor de la electricidad. El enorme campo magnético de Júpiter se debe a su gran tamaño, a su manto metálico y fluido que llena gran parte de su volumen y a lo rápido que gira sobre su propio eje (10 horas para completar una vuelta). El entorno espacial de un planeta donde predomina su propio campo magnético se llama *magnetosfera*. La de Júpiter se extiende unos 60 radios jovianos. Si lo único que pudiéramos ver de Júpiter fuera su campo magnético, se vería más grande que el Sol, cuyo radio es apenas unas 10 veces mayor que el de Júpiter.

Un campo magnético constante como el de un imán en reposo ejerce una fuerza sobre los cuerpos eléctricamente cargados en movimiento. Pero si el campo magnético es variable, por ejemplo, si se mueve, produce además un campo eléctrico y, por lo tanto, fuerzas eléctricas. La rápida rotación del campo magnético de Júpiter genera un campo eléctrico que también rota con él. Este campo eléctrico arrastra hacia el planeta los cuerpos cargados negativamente y repele los cuerpos cargados positivamente. Para que un cuerpo sea expulsado, es decir, acelerado en la dirección de escape, la fuerza eléctrica de repulsión debe ser mayor que la atracción gravitacional. Para eso se requiere una carga eléctrica relativamente grande en una masa pequeña; por ejemplo, una partícula de polvo cargada como las que provienen de las erupciones volcánicas de Io.

Se estima conservadoramente que Io emite por lo menos una tonelada de materia



Polvo cósmico de la alta atmósfera de la Tierra visto bajo el microscopio electrónico: a) partícula de silicatos pegada a una esfera de óxido de aluminio; b) partícula de varios tipos de silicatos y carbono probablemente de origen meteorítico; c) esfera de vidrio parcialmente cubierta del gel usado en las trampas de partículas de las sondas y satélites espaciales, y d) partícula de vidrio con incrustaciones de hierro, níquel y sulfuros, proveniente del medio interestelar.

Fotos: NASA/JPL



al espacio joviano cada segundo. Aproximadamente un kilogramo de este material, es decir, una milésima parte, escapa al medio interplanetario cada segundo como parte de los haces de polvo jovianos. De los datos colectados con los detectores gemelos de *Ulises* y *Galileo* se infiere también que las partículas de polvo que pueden escapar tienen tamaños del orden de 10 nanómetros, es decir, de una centésima de micra o una cienmillonésima de metro. El por qué de este tamaño en particular se explica por el balance entre la fuerza de gravedad y las fuerzas electromagnéticas. Las partículas de polvo más pesadas —con más masa—, aunque estén eléctricamente cargadas, sienten más la intensa fuerza gravitacional de Júpiter y quedan en órbita, como los granos de los anillos de polvo. Las partículas de polvo menos masivas son más afectadas por las fuerzas electromagnéticas y quedan simplemente atrapadas en el campo magnético joviano, sin posibilidades de escapar. Las partículas de los haces están en un balance perfecto de masa y carga.

Con un grano de sal

Como el elemento predominante en las emisiones volcánicas de Io es el azufre, se esperaba que los granos de polvo de los haces contuvieran principalmente este elemento, o bien compuestos sulfurosos. No tardaríamos en saber que esta idea es sólo parcialmente correcta. Para despejar la incógnita se aprovecharon los detectores mejorados de la sonda espacial *Cassini*, cuyo objetivo era Saturno, pero que pasó muy cerca de Júpiter entre 1999 y 2000. La nave *Cassini* llevaba un espectrómetro de masas, aparato capaz de estimar confiablemente la composición de las partículas de polvo.

Cuando la nave se encontró con los haces de polvo y analizó la composición de los granos, los resultados sorprendieron tanto a los científicos espaciales, que pensaron que podría haber un error. Al parecer, ¡Júpiter expulsa granos de sal! Aunque los granos de polvo contienen compuestos sulfurosos y potasio, todo indica que el compuesto más abundante es el cloruro de sodio —es decir, la sal común—. Ésta probablemente es uno de los compuestos que se condensan con mayor facilidad en las fumarolas volcánicas de Io.

Océano de plasma solar

Una vez definidos la fuente de los haces de polvo jovianos, sus mecanismos de escape y su composición, seguía sin saberse por qué este fenómeno se manifestaba en forma de haces, lo que a final de cuentas es la cuestión esencial: si los volcanes de Io emiten polvo de forma regular y éste escapa continuamente del espacio joviano, ¿por qué las sondas lo detectan como ráfagas y no como un flujo continuo?

Se sabía que los haces sólo eran observables fuera de la magnetosfera de Júpiter y que tenían una periodicidad de alrededor de 27 días, coincidente con el periodo de rotación del Sol sobre su eje, lo que sugería que el Sol

desempeñaba un papel importante en su formación. Los planetas del Sistema Solar están inmersos en la tenue atmósfera del Sol, llamada corona, que se expande continuamente produciendo un viento solar de plasma compuesto principalmente de protones que viajan en promedio a 400 km/s y transportan también el campo magnético del Sol a los confines del Sistema Solar. La magnetosfera puede verse como la frontera que separa los dominios de un planeta del campo magnético del Sol y el medio interplanetario. En el caso de la Tierra, la magnetosfera es una coraza protectora que evita que el viento solar barra con nuestra atmósfera, los océanos y la vida. Desde el punto de vista de las sondas espaciales, el polvo emitido por Io se mantenía como un flujo continuo dentro de la magnetosfera. Al salir de ella y entrar en contacto con el medio interplanetario, el flujo se separaba en haces. El fenómeno se debía, así, a las irregularidades del medio interplanetario causadas por el viento solar.

Cuestión de compresión

Hay zonas de la superficie del Sol que emiten plasma de baja velocidad —viento lento— y otras que arrojan viento más rápido. Como el flujo de plasma que compone el viento solar se emite sin parar, el viento más rápido arremete contra la retaguardia del lento, generando enormes olas de plasma comprimido cuya densidad, temperatura

y velocidad se incrementan notablemente, lo que hace aumentar también el campo magnético que transportan. Estas zonas de plasma comprimido se conocen como *regiones corrotantes de interacción* o *CIR* —por sus siglas en inglés— y también forman enormes espirales alrededor del Sol siguiendo la configuración del campo magnético solar, que se deforma debido a su propia rotación.

Las CIR forman así enormes tentáculos solares en expansión que barren todo el



medio interplanetario. Pueden ser de hasta 1 UA de ancho, de modo que, pese a los 800 km/s con que llegan a desplazarse, pueden tardar varios días en cruzar la órbita de un planeta.

Como dijimos, las partículas de polvo cargadas obedecen en cierta medida a lo que les dictan los campos magnéticos y son afectadas por los plasmas. Cuando el flujo continuo de polvo cargado proveniente de Júpiter entra en contacto con el plasma comprimido de las CIR, también se comprime y se desvía de su trayectoria original. Los granos se acercan más entre sí y forman las regiones concentradas de polvo que las naves perciben como ráfagas o haces. Si el polvo fuera eléctricamente neutro, sólo se vería afectado por los iones que llegaran a chocar sobre su superficie. La carga de los granos de polvo es de nuevo determinante y sin ella esta compresión no sería posible. En este caso, la masa de los granos y su gran velocidad tienen un papel importante, pues estos granos son suficientemente pequeños y su carga es suficientemente grande como para ser afectados por las CIR. Al mismo tiempo, son lo bastante rápidos y paradójicamente lo bastante masivos como para no ser arrastrados, por lo que pueden atravesar las CIR. Desde su aproximación a Júpiter hasta que alcanzan su magnetosfera, una CIR comprimirá la totalidad del flujo de polvo que escapa. Cuando esta ola de plasma haya pasado, el flujo volverá a ser normal y continuo, pero tan poco denso que será difícil distinguirlo del polvo de fondo, excepto por su gran velocidad. En principio, la órbita de un planeta es barrida al menos por una

CIR cada mes, pero si la actividad solar se incrementa, la frecuencia e intensidad de las CIR también aumenta. La actividad solar, por tanto, define el ritmo de formación de los haces y también su intensidad. Una CIR intensa hará que las ráfagas de polvo en los alrededores de la magnetosfera de Júpiter sean más concentradas y violentas; por el contrario, si la CIR es débil, muy probablemente no se producirá ningún haz de polvo.

Ráfagas saturnianas

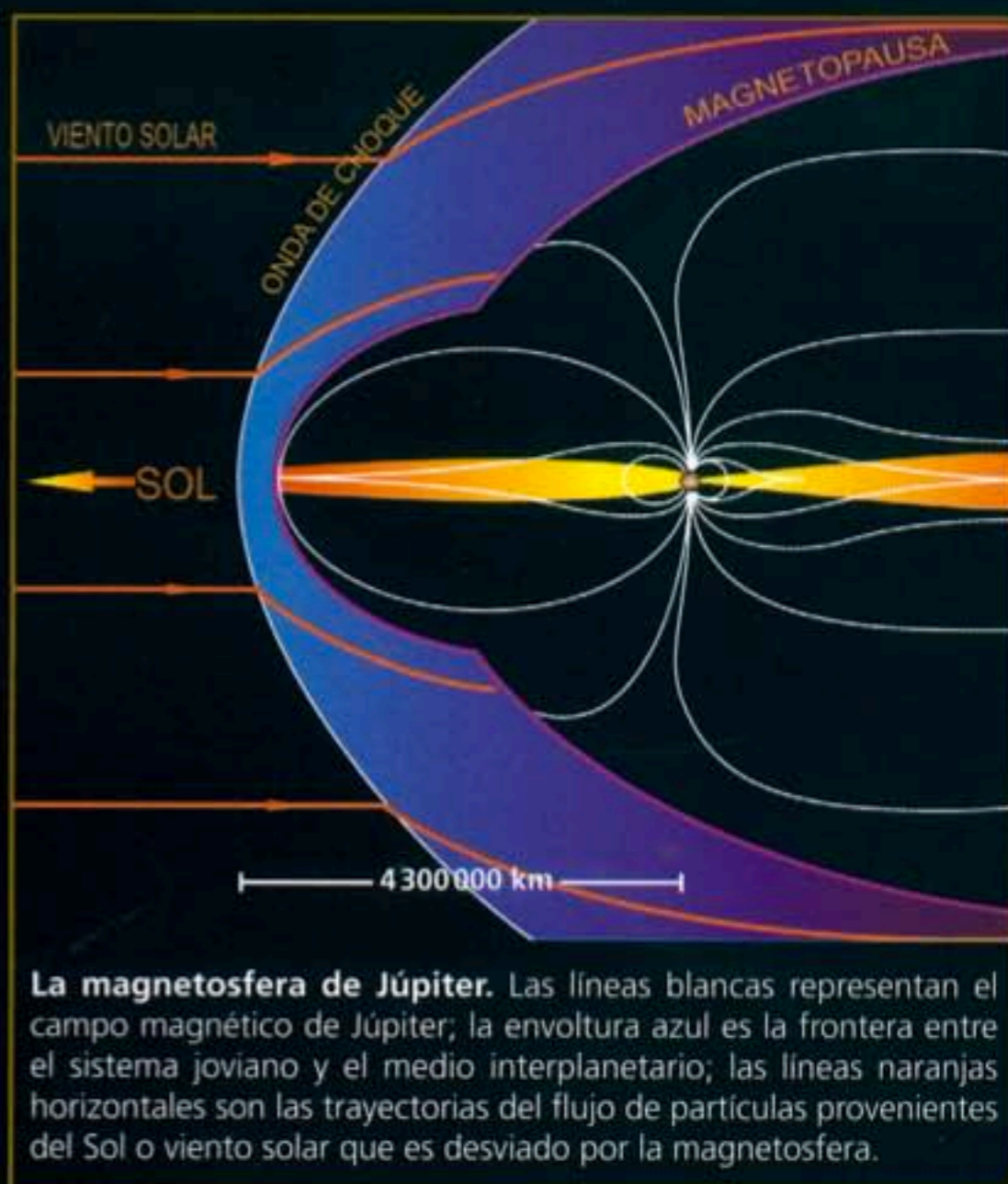
El fenómeno de los haces o ráfagas de polvo no es exclusivo de Júpiter. Poco después del descubrimiento, los científicos espaciales predijeron que algo parecido debía suceder en Saturno por las similitudes entre ambos planetas. Saturno posee un campo magnético suficientemente intenso — a pesar de que su intensidad es de apenas 5% la del campo de Júpiter — así como fuentes importantes de polvo. Después de su paso por Júpiter, la sonda *Cassini* confirmó esta hipótesis.

Cuando la sonda se hallaba todavía a un par de unidades astronómicas de Saturno, empezó a detectar ráfagas de polvo. Al principio se pensó que la fuente era el anillo de polvo denominado E, el más externo del conjunto de los tres anillos de polvo exteriores (E, F y G). Es el más ancho de los anillos de Saturno y el más grande del Sistema Solar; se compone totalmente de finas partículas que en su mayoría son hielo de agua. La idea del anillo E como fuente de haces de polvo se fortaleció cuando en 2005 *Cassini* se sumergió en él y descubrió que el polo sur de la pequeña luna Encelado, con apenas el 2% del tamaño de nues-

tra luna, alimentaba al anillo E emitiendo géiseres de vapor y polvo de hielo a alta presión producidos por un tipo de vulcanismo frío conocido como *criovulcanismo*.

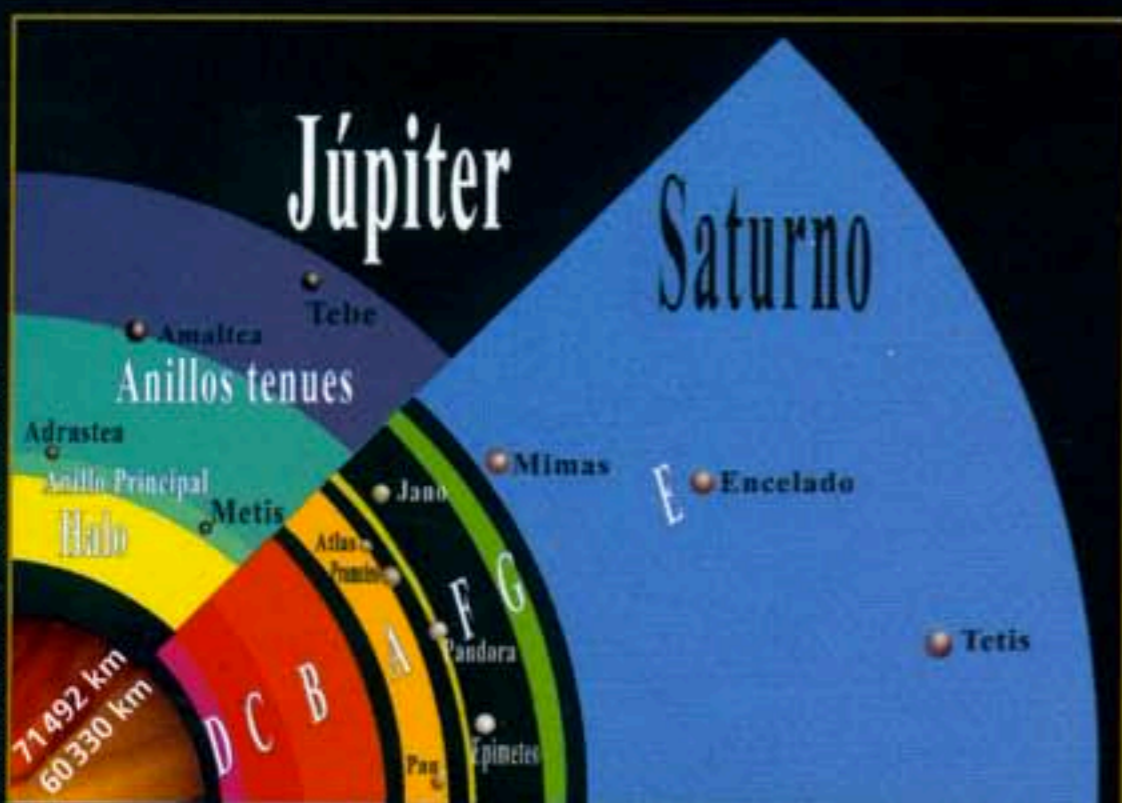
Cuando el espectrómetro de la sonda *Cassini* determinó que las partículas de los haces saturnianos se componían de un 30% de agua y un 70% de silicatos — compuestos a base de silicio y oxígeno —, no quedó del todo claro cuál podría ser su fuente real. Una mayor abundancia de silicatos hace pensar que, muy probablemente, la fuente podía ser el anillo A, uno de los tres anillos rocosos principales (A, B y C). Pero aún no podemos descartar al anillo E como posible fuente y además podría haber otras fuentes que cumplieran con los requisitos de composición y balance de carga/masa; por ejemplo, el polvo dispersado por impactos de meteoritos muy rápidos en lunas externas como Rhea, que es 30% más pequeña que nuestra luna y que orbita más allá del anillo E. Quizá los nuevos datos colectados por *Cassini* nos darán la respuesta. 🗨️

Alberto Flandes estudió física en la UNAM y tiene maestría y doctorado en física espacial. Trabaja en el Departamento de Investigaciones Solares y Planetarias del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Participa en las investigaciones sobre los haces de polvo de Júpiter y Saturno desde 2003.



La magnetosfera de Júpiter. Las líneas blancas representan el campo magnético de Júpiter; la envoltura azul es la frontera entre el sistema joviano y el medio interplanetario; las líneas naranjas horizontales son las trayectorias del flujo de partículas provenientes del Sol o viento solar que es desviado por la magnetosfera.

Ilustración: Alberto Flandes



Comparación de las proporciones aproximadas de los sistemas de anillos de Júpiter y Saturno. (Nótese que el radio de Júpiter es más de 10 000 kilómetros mayor que el de Saturno).

Ilustración: Alberto Flandes