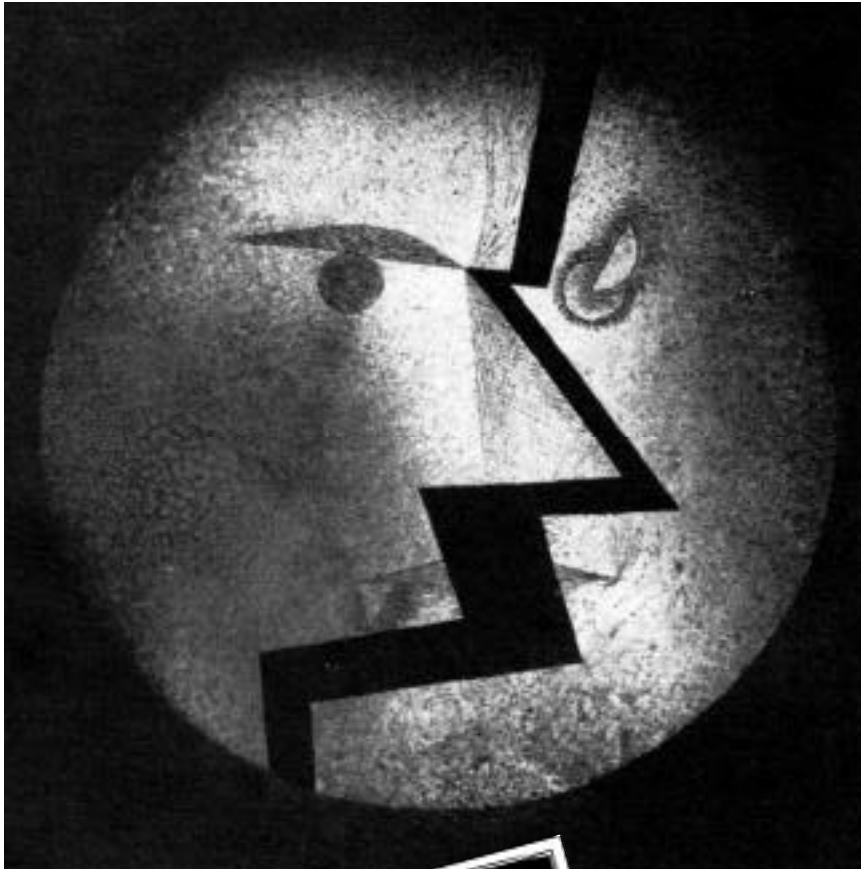


Los anillos

JULIA ESPRESATE

de Saturno



Saturno es el sexto planeta en orden de distancia al Sol. Está casi diez veces más alejado del Sol que la Tierra y es el segundo planeta más grande del sistema solar después de Júpiter.

Una de las características que hacen de Saturno un planeta excepcional es el enorme e intrincado sistema de “anillos” que lo rodea. En 1610, Galileo fue el primer astrónomo que utilizó un telescopio con el fin de observar los cuerpos celestes; al dirigir su telescopio hacia Saturno observó tres estructuras esféricas y alineadas, la mayor en el centro y otras dos de menor tamaño a cada lado. Al principio se pensó que eran tres cuerpos.

Fue casi sesenta años más tarde cuando el astrónomo holandés Christian Huygens observó que Saturno era un sólo cuerpo esférico rodeado por un disco brillante en su plano ecuatorial. En esa época no existía la posibilidad de tomar fotos de lo que se observaba con los telescopios, así que los astrónomos hacían dibujos de lo que veían. En 1676, el astrónomo Gian Domenico Cassini, casi setenta años después de las observaciones de Galileo, volvió a observar a Saturno y vio el cuerpo central esférico (es decir, el planeta Saturno) pero rodeado por dos discos brillantes, uno más externo y delgado llamado anillo A y uno más ancho e interno llamado B; ambos discos estaban separados por una región oscura, aparentemente vacía, a la que se llamó la División de Cassini. Fue hasta 1845, más de doscientos años después, cuando el astrónomo A. Common tomó directamente desde su telescopio la primera fotografía de este fascinante planeta. La presencia de anillos o discos alrededor de planetas no se había detectado en ningún otro cuerpo del sistema solar.

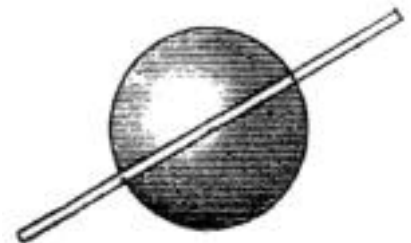
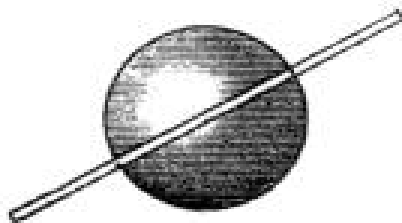
Hasta ese momento se pensaba que los discos o anillos A y B eran estructuras sólidas alrededor de Saturno. Sin embargo, esta suposición significaba una contradicción muy seria con las leyes de la física. Durante la segunda mitad del si-

glo pasado, el físico James Clerk Maxwell se dio cuenta de que si los anillos tenían un ancho de aproximadamente cien mil kilómetros, como se deducía de las observaciones, entonces tendrían que estar hechos de algún material desconocido y de una dureza formidable de manera que pudiesen resistir la diferencia de la fuerza de atracción gravitacional de Saturno entre sus dos extremos. La fuerza de gravedad depende de la distancia entre los cuerpos y mientras menor es la distancia mayor es la fuerza de gravedad. Es decir, la parte interna de estos discos estaba sujeta a una fuerza de atracción hacia Saturno mucho mayor que la parte externa, dado que la parte interna se encuentra mucho más cerca de Saturno que la parte externa. Esta diferencia en la atracción gravitacional existente entre el borde interno y el externo resquebrajaría y rompería cualquier estructura sólida.

rosas y observadas desde tan lejos dieran la impresión de ser una estructura uniforme y sólida. Su propuesta fue aceptada de inmediato por la comunidad científica. Desde entonces y hasta la fecha solamente han existido verificaciones observacionales indirectas de que, en efecto, los dos principales discos que rodean a Saturno están formados por una inmensidad de pequeños satélites. Estas observaciones son evidencia indirecta porque de hecho ninguna nave espacial de las enviadas ha podido tomar una imagen de alguna de estas piedritas. En general las naves se colocan bastante lejos de los planetas que exploran y, a esa distancia, el equipo de adquisición de imágenes que llevan consigo es insuficiente para distinguir un objeto menor de diez kilómetros de tamaño. A partir de las observaciones hechas por la nave Pioneer 11 en 1979, y principalmente por

te, las observaciones de las naves Viajero fortalecieron aún más la teoría propuesta por Maxwell y dieron indicios de los diversos tamaños de las partículas o satélites.

Sin embargo, esta reconciliación no resulta tan sencilla e inmediata y trae consigo problemas nuevos no resueltos. Uno de los nuevos problemas es ¿cuánto tiempo pueden durar estos anillos alrededor de Saturno?, o antes de eso, ¿por qué habrían de tener una duración finita? Otra vez, las leyes de la física son las responsables. Si los anillos son en efecto un inmenso enjambre de partículas con tamaños del orden de metros (la mayoría), muy probablemente haya colisiones entre ellas. En cada una de estas colisiones ambas partículas pierden energía de movimiento de traslación alrededor de Saturno. Desde que Newton formuló la ley de la gravedad se sabe que una pér-



Esta situación era aún más dramática para el disco interno y más ancho, o sea, el anillo B, simple y sencillamente porque es el que se encuentra más cerca de Saturno.

La propuesta de Maxwell

Para resolver el problema, Maxwell propuso que los discos no fuesen estructuras sólidas sino que estuviesen formados por una cantidad gigantesca de piedritas o pequeños satélites en órbita alrededor de Saturno, que al ser tan nume-

las naves Viajero I y II, en 1980, a su paso por Saturno, se piensa que los tamaños de estos numerosos satélites que conforman los anillos van desde una milésima de milímetro (un grano de polvo), hasta algunos kilómetros (como montañas). La mayoría de estos pequeños satélites tienen tamaños del orden de algunos metros.

Una vez aceptada la teoría de los anillos como un inmenso enjambre aplastado de partículas en órbita, se logró reconciliar la existencia de los anillos con las leyes de la física. Posteriormente,

la pérdida de energía de traslación causa que la partícula “emigre” a una órbita más interna, es decir, más próxima a Saturno. Dejando de lado los detalles finos de este proceso de colisiones, el resultado final que la física predice es que la inmensa mayoría de las partículas del enjambre se acercarán tanto a Saturno que terminarán siendo “tragadas” por éste y solamente unas cuantas partículas emigrarán hacia el exterior, es decir, se encontrarán en órbitas mucho más lejanas a Saturno que aquellas en las que se iniciaron.

¿Qué edad tienen?

Los cálculos teóricos que se han hecho basados en la frecuencia de colisiones entre estas partículas y la pérdida de energía en cada colisión indican que si los anillos se formaron al mismo tiempo que Saturno, entonces después de tres mil quinientos millones de años de colisiones (edad estimada del sistema solar) ya deberían haber sido tragados por Saturno. Por tanto, no debieran estar ahí. Sin embargo, están ahí.

La edad estimada del sistema solar es de aproximadamente tres mil quinientos millones de años. Nosotros hemos sido testigos de la existencia de los anillos de Saturno solamente durante los últimos cuatrocientos años. ¿Estaban ahí desde antes?, ¿se formaron al mismo tiempo que Saturno y lo han acompañado desde entonces?, o ¿fuimos increíblemente afortunados y se formaron hace poco y los pudimos observar con nuestros telescopios? Y digo "increíblemente" porque cuatrocientos años es tan sólo una diezmillonésima parte de la existencia del sistema so-

lar; pero si además pensamos que *Homo sapiens* lleva tan sólo algunos miles de años sobre la Tierra, la probabilidad de que los anillos estuviesen ahí para observarlos con nuestros telescopios cuando los desarrollamos resulta alarmantemente pequeña.

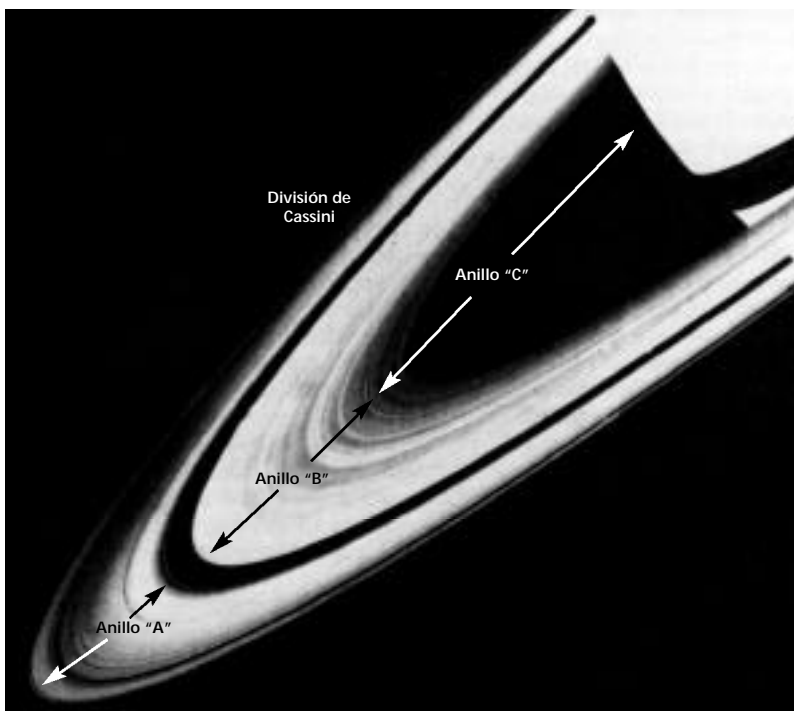
Así pues, hay al menos dos posibilidades: 1) los anillos de Saturno son de formación reciente, o 2) hay algún mecanismo que está actuando para frenar la caída de estas partículas hacia Saturno.

Respecto a la primera hipótesis hay que reconocer que los científicos son siempre renuentes a pensar que somos increíblemente afortunados. Siempre prefieren pensar que lo que observamos es común en todo el universo y que nuestra presencia en el sistema solar no tiene por qué coincidir con algún fenómeno fuera de lo común. Ésta es la parte filosófica que permea las mentes de la mayor parte de los astrónomos, por tanto prefieren pensar que los anillos se formaron al mismo tiempo que Saturno y que no se han caído todavía porque existe algún mecanismo aún desconocido pero totalmente natu-

ral y explicable que al menos retarda enormemente esta caída. De cualquier modo no hay que dejar de explorar la posibilidad de que los anillos se hayan formado recientemente. Hasta ahora todos los intentos por construir una teoría consistente acerca de su reciente formación han fallado, aunque esto no significa que la idea haya sido desechada, pues sigue estando en la mente de todos nosotros y hay astrónomos dedicados a construir una teoría plausible sobre la reciente formación de los anillos.

A diferencia de la hipótesis de la formación reciente, la segunda hipótesis ha construido ya modelos teóricos muy prometedores y consistentes con la física que podrían explicar el retardamiento en la caída de los anillos hacia Saturno. Y aunque no están del todo completos y falta mucho por investigar hay fuertes evidencias de que existe un mecanismo retardante y efectivo. Antes de explicar en qué consiste dicho mecanismo discutiremos algunos conceptos básicos.

Saturno es una gran masa de gas y tiene forma esférica. En realidad debido a su rápida rotación está ligeramente achatado en los polos, pero puede considerarse esférico sin cometer un error grande. De acuerdo con la ley de la gravitación de Newton, la velocidad con la que un cuerpo en órbita alrededor de Saturno se traslada depende de su distancia al centro de Saturno, de manera que mientras más alejado el cuerpo más lenta es su velocidad de traslación. Si los anillos de Saturno están en efecto constituidos por pequeños satélites en órbita, entonces los pequeños satélites que se encuentran más próximos a Saturno son los que se desplazan a mayor velocidad comparados con los que están más alejados. Cada satélite o piedrita del enjambre sigue la órbita predicha por la ley de la gravedad y tarda cierto intervalo de tiempo en dar una vuelta completa alrededor de Saturno; a este intervalo de tiempo se le llama periodo orbital. Las partículas más alejadas de



Saturno son las de periodo orbital más grande, no sólo porque tienen que recorrer un círculo más grande sino también porque se trasladan más lentamente. Entonces, para cada órbita (circular) existe una velocidad específica de traslación y un periodo orbital únicos y bien definidos. Es decir, no puede haber dos partículas con la misma velocidad de traslación en órbitas circulares de diferente radio. Esta misma ley de la gravitación es la que rige el movimiento de los planetas en torno al Sol y de los satélites en torno a los planetas.

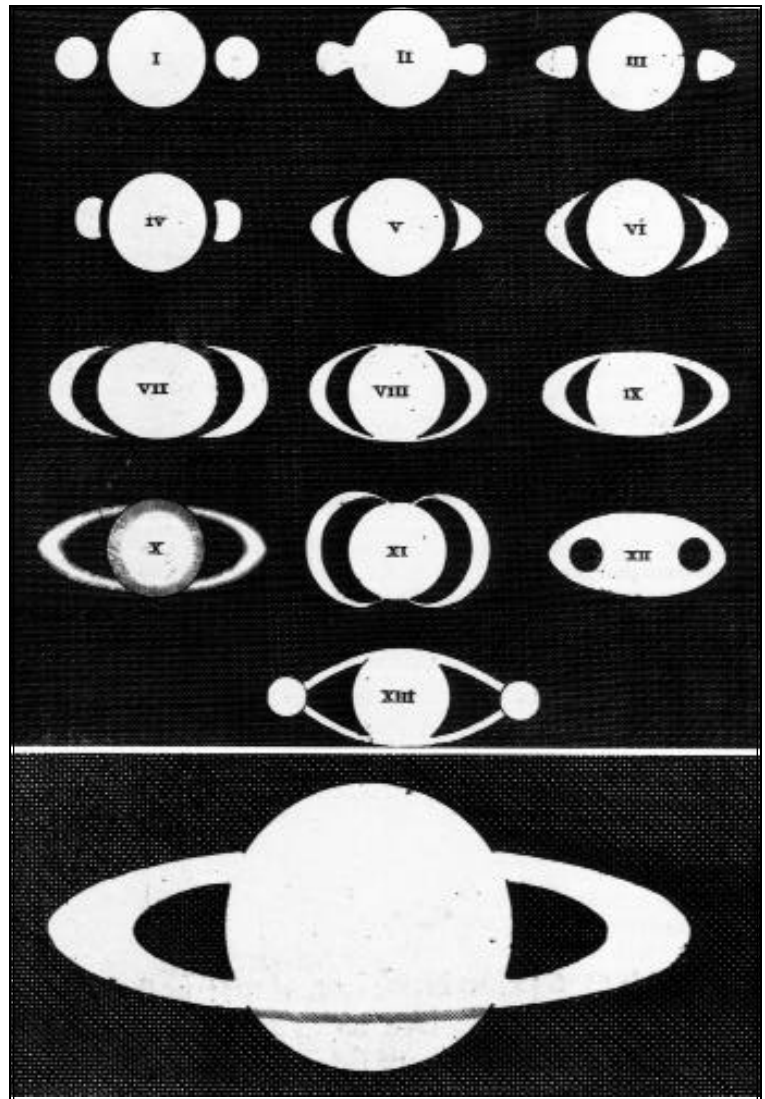
Además de sus espectaculares anillos, Saturno posee toda una familia de satélites grandes que también giran en órbita alrededor de él. Hay dos diferencias fundamentales con los satélites que forman los anillos: una es la distancia a Saturno y la otra es el tamaño. Como dije anteriormente, la mayoría de las piedritas (satélites pequeños) que conforman los anillos tienen tamaños de algunos metros. Además orbitan a distancias no mayores de ciento treinta y seis mil kilómetros medidos desde el centro de Saturno. Los satélites grandes, en cambio, tienen tamaños que van desde algunas decenas de kilómetros hasta miles de kilómetros; sus distancias al centro de Saturno son mayores de ciento treinta y seis mil kilómetros, que es más o menos la ubicación del borde externo del anillo A. Es decir, están más alejados de Saturno que el borde más externo de los anillos principales, en consecuencia, sus velocidades de traslación alrededor de Saturno son menores a la de cualquier piedrita que se encuentre dentro de los anillos.

Entonces, el escenario en Saturno es el siguiente: un enorme planeta gaseoso y esférico al centro (Saturno), un enjambre aplanado de partículas formando dos bandas principales alrededor de éste y una serie de satélites mayores que orbitan a su alrededor, pero en su mayoría externos al disco formado por el enjambre de partículas pequeñas. En este escenario, “el

rey del baile” es Saturno mismo, pues todos los demás están atrapados en su campo gravitacional. Sin embargo, los satélites grandes, aunque sean mucho menores que Saturno y no puedan competir cuando de atracción gravitacional se trata, pueden y de hecho ejercen atracción gravitacional sobre las piedritas que conforman las bandas. Esta atracción o influencia gravitacional sobre las piedritas es, en general, completamente despreciable en comparación con la que Saturno ejerce sobre ellas y solamente produce pequeñísimas perturbaciones en las órbitas de las piedritas sin causar ninguna consecuencia que se pueda considerar importante.

Las propuestas contemporáneas

A muchos astrónomos les llamaba la atención la existencia de la División de Cassini entre los anillos (o bandas) A y B. El ancho de la División es de aproximadamente cuatro mil seiscientos kilómetros. Es decir, si las partículas estaban colisionando, ¿por qué las partículas del anillo externo (A) no habían emigrado ya hacia adentro, relleno así la División de Cassini? Una cosa es que el proceso de migración se retarde y otra es que de plano no hubiera emigrado prácticamente ninguna partícula durante todo este tiempo. Hay que recordar que allí donde termina



el anillo B empieza la División de Cassini y allí donde termina la División de Cassini empieza el anillo A (mirando las cosas desde Saturno hacia afuera). La pregunta que se planteó fue, entonces, ¿qué es lo que mantiene a la División de Cassini?, ¿qué impide a las partículas del anillo A su natural migración hacia órbitas más internas? o, de igual modo, ¿qué impide a las partículas del anillo B emigrar hacia afuera y rellenar la División de Cassini? Hay que recordar que en el modelo de las colisiones en el enjambre la mayor parte de las partículas emigran hacia adentro, hacia Saturno, pero hay algunas que lo hacen hacia afuera. Estas

metros de diámetro aproximadamente, o sea, pertenece a la familia de satélites grandes de Saturno. Pues bien, de sus cálculos resultó que el periodo orbital de Mimas era exactamente el doble del de las partículas del borde externo del anillo B. Es decir, una partícula del borde del anillo B se encontraba alineada con el satélite Mimas cada dos vueltas completas alrededor de Saturno. Cuando la partícula y Mimas están alineadas es cuando Mimas ejerce su mayor (aunque todavía pequeña) perturbación gravitacional sobre la partícula. A esta situación de múltiplos enteros entre periodos orbitales se le llama "resonancia" o "conmensurabilidad".

grar y poblar la División de Cassini. El borde externo del anillo A, que también debiera estar extendiéndose hacia afuera, también está controlado por la interacción resonante con el satélite Janus, de aproximadamente doscientos kilómetros de diámetro y que orbita a una distancia de aproximadamente ciento treinta y siete mil kilómetros de Saturno. En este caso, el periodo orbital de las partículas en el borde externo del anillo A es tal que por cada siete vueltas completas alrededor de Saturno, Janus da seis vueltas completas y quedan alineadas con él. La pregunta que surgió de inmediato fue ¿y el borde externo de la División de Cassini cómo se controla?



preguntas fueron el inicio de la construcción del modelo teórico del mecanismo para retardar la migración de partículas.

En 1978, Peter Goldreich y Scott Tremaine, dos afamados astrofísicos, se dieron cuenta de un pequeño pero muy revelador detalle concerniente al borde externo del anillo B, justo donde empieza la División de Cassini. Calcularon el periodo orbital para aquellas piedritas que formaban el borde externo del anillo B y lo compararon con el periodo orbital del satélite Mimas que orbita a ciento ochenta y cinco mil kilómetros de Saturno, fuera del sistema de anillos. Mimas es un satélite de cuatrocientos kiló-

De otros estudios en otros campos de la física se sabía ya que las situaciones resonantes pueden causar enormes perturbaciones, así es que Goldreich y Tremaine no dudaron en echar mano de toda la herramienta física y matemática para analizar esta situación resonante en particular. Su magnífico resultado fue que esta situación resonante impedía la migración de las partículas hacia afuera y las mantenía a raya en el borde externo del anillo B. Es así como se dio la primera explicación exitosa del borde interno de la División de Cassini. En pocas palabras, la interacción resonante con Mimas mantiene a las partículas frenadas en el borde del anillo B y les impide emi-

¿Cómo se evita ahora la migración hacia adentro de las partículas del anillo A? Note el lector que los bordes externos de los anillos A y B están siendo confinados en contra de la expansión hacia fuera gracias a la interacción resonante con dos satélites (Janus y Mimas respectivamente) que están en órbitas que son externas a ambos anillos. Es decir, dos satélites cuyo periodo orbital es mayor que el periodo orbital de las partículas en los bordes externos de los anillos A y B.

Por otro lado, la teoría de Goldreich y Tremaine predice que para controlar migraciones hacia órbitas más internas se necesita la situación inversa, esto es, el satélite tiene que encontrarse en una órbi-

ta más interna que las órbitas de las partículas que debe frenar. Es decir, el periodo orbital del satélite tiene que ser menor que el de las partículas en el borde interno del anillo A. Esto implica un satélite cuya órbita esté dentro de la División de Cassini o incluso inmerso en el anillo B.

Algunos problemas no resueltos

Hasta ahora no ha sido posible identificar ningún satélite dentro de la División de Cassini que pueda producir el frenado de la migración hacia adentro de las partículas en el borde interno del anillo A. De antemano se sabe que cualquier satélite orbitando en la División de Cassini o incluso en el anillo B, no puede ser mucho mayor a los dos o tres kilómetros de tamaño. Un objeto de estas dimensiones pasaría totalmente inadvertido en las imágenes tomadas por las naves Viajero I y II, que son las que han podido observar desde más cerca al sistema de anillos de Saturno. Ojalá que la sonda espacial Cassini que ya va de camino a Saturno con un equipo para captar imágenes muchísimo más moderno nos permita detectar al responsable del borde interno del anillo A.

En resumen, la teoría de Goldreich y Tremaine ha sido muy exitosa para explicar los bordes externos de los anillos A y B de Saturno. Sin embargo, una explicación similar para los bordes internos no se ha podido verificar debido a la aparente ausencia de satélites cuyas órbitas sean interiores a las de los bordes internos y que puedan estar en resonancia.

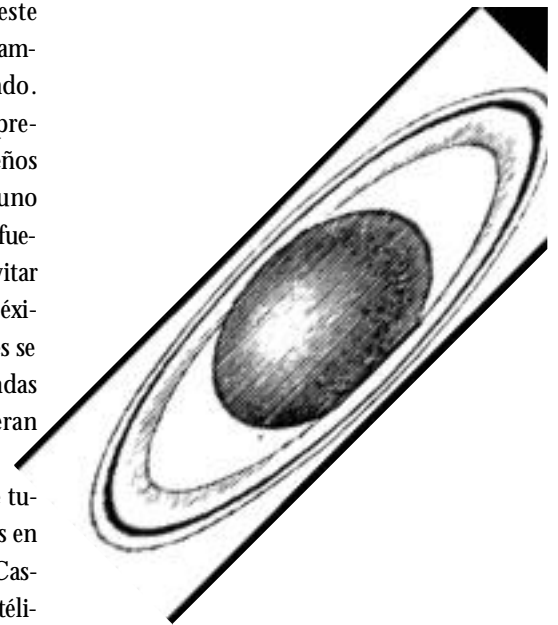
Uno de los éxitos más rotundos de la teoría de Goldreich y Tremaine fue respecto al anillo F de Saturno. Éste es un anillo realmente “delgado”, pues su ancho



se estima entre treinta y quinientos kilómetros, mientras que los llamados anillos A y B tienen anchos de quince mil y veinticinco mil kilómetros, respectivamente, por lo que se parecen más a una banda que a un anillo. El anillo F se encuentra justo afuera del borde externo del anillo A con una órbita de ciento cuarenta mil kilómetros aproximadamente. Los bordes del anillo F sugerían exactamente las mismas preguntas que se hacían respecto de los bordes de los anillos A y B, ya que este anillo también está formado por un enjambre de partículas que están colisionando. La teoría de Goldreich y Tremaine predecía que tenía que haber dos pequeños satélites a ambos lados del anillo F; uno externo para evitar la expansión hacia afuera del enjambre y uno interno para evitar la expansión hacia adentro. Esta vez el éxito fue rotundo, ya que ambos satélites se encontraron en las imágenes enviadas por las naves Viajero I y sus órbitas eran resonantes con ambos bordes!

La teoría de Goldreich y Tremaine tuvo su primer éxito completo y estamos en espera de los resultados de la misión Cassini para ver si se logra identificar al satélite responsable del borde interno del anillo A y de muchas otras sorpresas que traerán las nuevas imágenes.

Es importante agregar que los anillos A y B no son bandas uniformes, pues presentan una serie de estructuras como corrugamientos verticales con forma espiral y acumulaciones de partículas en ciertos lugares que también forman un patrón espiral alrededor de Saturno. La División de Cassini no es la única región con poco material, ya que hay otras regiones de hecho más vacías que la División de Cassini que también circundan a Saturno pero que son mucho más estrechas. Aproximadamente 85% de los lugares donde se observan todas estas estructuras espirales o “canales vacíos” están asociados con resonancias orbitales entre las partículas y los satélites grandes. Es así que la interacción resonante parece ser uno de los principales mecanismos que rigen la estabilidad y probablemente la perdurabilidad de la extravagante estructura de los anillos de Saturno. ➔



Julia Espresate

Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México.

IMÁGENES

P. 58: Paul Klee, *Physionognomic lightning*, 1927. Francisco Rodríguez, *Saturno el 11 de marzo de 1885*, P. 59 Posiciones de Saturno y su anillo con respecto a la tierra, ca. 1851. P. 60: NASA (fotografía

del *Voyager*), *Los anillos de Saturno*, 1981 P. 61: Huyghens, *Systema Saturni*, 1659. P. 62: NASA, *Los anillos de Saturno*, 1981 P. 63: Almendra Carrillo Aguilar, *Saturno*, 1997; Saturno, ca. 1851.