



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO

*Estudios térmicos de los anillos principales de Saturno*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**Licenciada en Ciencias de la Tierra**

PRESENTA:

**Fátima Juárez Aparicio**

DIRECTOR:

Dr. José Alberto Flandes Mendoza

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# *Agradecimientos*

*Por aceptar ser mi tutor y darle seguimiento a mi Servicio Social y ahora apoyarme en la dirección de esta tesis, agradezco al Dr. Flandes por todo el apoyo y el tiempo brindado para hacer de esta tesis un trabajo impecable, del cual se pueda obtener el grado y del cual pueda sentirme orgullosa. En verdad agradezco la transmisión de su conocimiento hacia mí.*

*Agradezco al programa de becas por parte del Instituto de Geofísica por su apoyo económico y permitirme dedicarle mayor tiempo a la redacción de esta tesis.*

*Agradezco a la Dra. Linda Spilker, manager científico de la Misión Cassini (Jet Propulsion Laboratory), por facilitarnos los datos del instrumento CIRS para el análisis de esta tesis.*

*Roberto, tú y mi familia son mis pilares para seguir con mis proyectos de vida. Muchas gracias por ese gran apoyo incondicional.*

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>II</b>
<b>Objetivos</b>	<b>II</b>
<b>1. Introducción I</b>	<b>1</b>
1.1. Breve análisis de los anillos de Saturno. . . . .	1
1.2. Los anillos de Saturno: Anillos principales y Anillos de polvo . . . . .	4
1.3. Comparación de los anillos de Saturno con otras estructuras anulares . . . . .	7
1.4. La importancia del estudio de los anillos de Saturno . . .	11
<b>2. Introducción II</b>	<b>14</b>
2.1. La relevancia de los estudios en el infrarrojo . . . . .	14
2.2. Radiación térmica . . . . .	15
2.3. Temperatura física y de brillo . . . . .	16
2.4. Albedo . . . . .	17
2.5. Profundidad Óptica . . . . .	18
2.6. Resonancias . . . . .	20
<b>3. La Misión Cassini y el espectrómetro CIRS</b>	<b>22</b>
3.1. Los predecesores de CIRS (IRIS) . . . . .	23
3.2. El espectrómetro de CIRS . . . . .	24
3.3. La Física detrás de CIRS . . . . .	28
3.4. Geometría de las observaciones . . . . .	29
3.5. Datos obtenidos por CIRS en Saturno . . . . .	32

<b>4. Modelos térmicos para los anillos principales</b>	<b>34</b>
4.1. Monocapa (L. Froidevaux) . . . . .	35
4.2. Multicapa (Y. Kawata y W.M. Irvine) . . . . .	37
4.3. Modelos recientes (A. Flandes, H. Salo y R. Morishima)	39
<b>5. Modelos usados</b>	<b>46</b>
5.1. Modelo 1 (T vs B') . . . . .	46
5.2. Modelo 2 (T vs $\alpha$ ) . . . . .	49
5.3. La base de datos . . . . .	51
5.4. Regiones de estudio . . . . .	52
<b>6. Perfiles de temperatura</b>	<b>55</b>
6.1. Perfiles de temperatura 1: Curvas de fase . . . . .	55
6.2. Perfiles de temperatura 2: Curvas de elevación solar . .	61
6.3. Variación de la temperatura con el ángulo de hora local ( $\Psi$ ) y con el ángulo de elevación de la nave (B) . . . . .	68
<b>7. Estructura de los anillos principales a partir de su pro- fundidad óptica y sus perfiles de temperatura.</b>	<b>70</b>
7.1. La estructura general de los anillos principales de Saturno	70
7.1.1. Estructura de las regiones homogéneas de los ani- llos principales de Saturno con datos del instru- mento UVIS de Cassini. . . . .	70
7.1.2. Estructura de las regiones homogéneas de los ani- llos principales de Saturno con datos del instru- mento CIRS de Cassini . . . . .	78
<b>8. Conclusiones</b>	<b>88</b>
8.1. Dinámica . . . . .	88
8.2. Composición . . . . .	94
<b>Apéndice</b>	<b>98</b>
 <b>Bibliografía</b>	 <b>100</b>

# Resumen

A partir de los datos del espectrómetro compuesto infrarrojo, CIRS, de la nave espacial Cassini, se hicieron análisis en el lenguaje de programación IDL para conocer la relación que tienen las diferentes geometrías de observación de Cassini (ángulo de elevación solar, ángulo de fase, ángulo de elevación de la nave y hora local) con la temperatura de los anillos principales para el lado iluminado (antes del equinoccio). Los datos se seleccionaron y se analizaron sólo en regiones específicas de los anillos. De las relaciones de temperatura y las geometrías de observación es posible inferir aspectos relevantes de su estructura, de su dinámica y de la composición de los anillos principales.

Existe una variación de la temperatura al variar las diferentes geometrías de observación. Para ángulos de fase bajos ( $< 30^\circ$ ) y de acuerdo a las curvas de fase la temperatura aumenta para todas las regiones de estudio, infiriendo la estructura vertical de los anillos. En el caso del ángulo de elevación solar y de acuerdo a las curvas de elevación solar, la temperatura disminuye al disminuir el ángulo, dando como resultado nociones en cuanto a la estructura de los anillos: la superposición de las partículas y las ondas de densidad creadas por las resonancias mantienen una profundidad óptica alta, infiriendo una estructura vertical. Las *wakes* (agrupamientos de las partículas debido a la gravedad) contribuyen a la estructura vertical y forman parte de la dinámica de los anillos. Por su lado, la composición fue inferida de algunos de los resultados obtenidos de CIRS, aunque, en su mayoría es el instrumento VIMS quien arroja que los anillos están compuestos principalmente de hielo (de agua), con algunas mezclas de contaminantes, que, en su

mayoría son compuestos orgánicos.

# Objetivos

- Identificar y estudiar las variaciones de temperatura en los anillos principales de Saturno en diferentes geometrías de observación con las observaciones del instrumento CIRS y en regiones específicas.
- Identificar y estudiar las variaciones de temperatura estacionales en los anillos principales de Saturno con las observaciones del instrumento CIRS en regiones específicas.
- Determinar, de las variaciones de temperatura identificadas en los puntos anteriores, aspectos relativos a la estructura y la dinámica y, en la medida de lo posible, de la composición de los anillos principales.

# Capítulo 1

## Introducción I

### 1.1. Breve análisis de los anillos de Saturno.

Saturno siempre se ha caracterizado por ser un planeta interesante debido al majestuoso y enigmático sistema de anillos que posee. Debido a esta característica fue el primer planeta con anillos que se pudo observar desde la Tierra. El primero en observar este sistema de anillos, a través de su telescopio, fue Galileo Galilei en 1610, pero pensó que se trataba de dos lunas gigantes que se encontraban en órbita alrededor de Saturno. Sin embargo, estas lunas parecían estar en una posición fija, a diferencia de los cuatro satélites de Júpiter que había observado con anterioridad. Por otra parte, cuando Galileo reanudó sus observaciones de Saturno en 1612 vio que las lunas gigantes habían desaparecido por completo. En 1656, Huygens finalmente dedujo la explicación correcta: que las extrañas lunas gigantes de Saturno era un disco aplanado de material en el plano ecuatorial de Saturno, que parece desaparecer cuando la Tierra pasa a través del plano del disco.

El estudio de la estructura dentro de los anillos de Saturno se originó con G. Campani, quien en 1664, observó que el medio interno del disco era más brillante que el medio externo. En 1675, G.D. Cassini descubrió una banda oscura entre el medio interno y el externo, que él interpretó como una brecha o laguna. Fue en 1791 que W. Herschel confirmó la existencia de esa brecha y se nombró División Cassini. Con lo anterior,

la naturaleza del disco se puso en duda y fue hasta 1859 cuando J.C. Maxwell demostró que la naturaleza del disco se componía de un número indefinido de partículas pequeñas, cada una en su propia órbita alrededor de Saturno (Maxwell, 1859). Más tarde, D. Kirkwood sugirió que la División Cassini es causada por una resonancia con una luna de Saturno y, P. Goldreich y S. Tremaine utilizaron las resonancias de Lindblad de las galaxias espirales para describir ondas espirales en los anillos (Goldreich y Tremaine, 1978). Actualmente se sabe que la estructura de los anillos no solamente se explica por medio de las fuerzas gravitacionales ejercidas por los satélites cercanos, también de la interacción con el campo magnético de Saturno, como son las estructuras radiales oscuras en el anillo B llamadas cuñas radiales (en inglés: spokes).

A pesar de que los anillos de Saturno son muy amplios, pocas estructuras en este sistema se pudieron detectar desde la Tierra. El progreso observacional y teórico hacia la comprensión de la física de los anillos era lento (de Pater y J. Lissauer, 2001).

En marzo de 1977, comenzó el auge de la exploración espacial de los anillos planetarios gracias al descubrimiento de los anillos de Urano (Elliot, et al. 1977). Las primeras naves espaciales en obtener las primeras imágenes espectaculares del sistema de anillos de Saturno fueron Pioneer 11 y los Voyager 1 y 2 (Figura 1.1) en 1979, 1980 y 1981, respectivamente.

Pioneer 11 descubrió dos nuevas lunas y el anillo F. Las primeras misiones con objetivo de estudiar los anillos de Saturno fueron Voyager 1 y 2, estas naves llevaban a bordo un instrumento sofisticado llamado IRIS (por sus siglas en inglés: Infrared Interferometer Spectrometer and Radiometer) que realizó mediciones de los anillos en el infrarrojo medio ( $2.5\mu\text{m}$ - $50\mu\text{m}$ ) y cercano ( $800\text{nm}$ - $2500\text{nm}$ ), y en el visible ( $390\text{nm}$ - $750\text{nm}$ ). Algunos de los resultados obtenidos por Voyager fueron la detección de cuñas radiales (en inglés: spokes) en los anillos, y su detallada estructura radial. En conjunto, las tres naves proporcionaron vistas más detalladas, mostrando un sistema de anillos mucho más complejo de lo que se pensaba, siendo los anillos principales caracterizados por varios



Figura 1.1: Imagen tomada por Voyager de los anillos principales de Saturno y cuatro de sus satélites helados (Tetis, Dione, Rea y Mimas) (NASA PIA00400).

anillos más pequeños y opacos (ringlets) y algunos huecos (gaps). El éxito y la gran cantidad de información obtenida por misiones como los Voyager y Galileo motivaron la creación de una nueva misión cuyo objetivo único fue estudiar el sistema de Saturno: la misión Cassini-Huygens. Esta misión tiene varios objetivos específicos, entre ellos, determinar la estructura tridimensional y el comportamiento dinámico de los anillos de Saturno, además de conocer su estructura e inferir su composición a través de mapas de temperaturas obtenidos por su instrumento a bordo, CIRS que era una versión mejorada del instrumento IRIS.

A diferencia de las misiones anteriores, la misión Cassini cuenta con instrumentos más sofisticados para la obtención de mejores y nuevos resultados en los anillos de Saturno. A pesar de que se han obtenido imágenes de muy alta resolución de los anillos principales, ninguna imagen ha podido mostrar los pequeños cuerpos o partículas que conforman a los anillos principales.

La misión Cassini-Huygens consta de dos etapas, la primera se designó como la Misión Equinoccio, ya que durante ella tuvo lugar desde

la inserción de la nave en órbita alrededor de Saturno, en julio de 2004, hasta el equinoccio en Saturno (12 de agosto del 2009). La segunda etapa es conocida como la Misión Solsticio, ya que la nave se mantendrá tomando datos hasta que ocurra el solsticio en Saturno en el 2017, cuando será el final de su misión con la inserción de la nave en la atmósfera de Saturno, después de cruzar sus anillos principales.

### 1.2. Los anillos de Saturno: Anillos principales y Anillos de polvo

El sistema de anillos de Saturno (ver Figura 1.2) es el más masivo, el más grande y el más diverso en el Sistema Solar. Por estas razones, es el más atractivo, desde el punto de vista científico y también es el mejor estudiado. Los anillos están hechos en su mayoría de hielo (de agua), pero las variaciones de temperatura medidas por CIRS, también indican que contienen otros compuestos que se añaden con el continuo bombardeo de meteoritos que Saturno atrae desde el exterior (Flandes, 2012). La abundancia de silicatos debe ser inferior a 1 % si se distribuye uniformemente dentro de las partículas de los anillos (Grossman, 1990). Esto es difícil de explicar y no existe un mecanismo claro que podría eliminar los silicatos de los anillos de Saturno.

Este sistema se divide en dos grandes regiones, los anillos principales y los anillos de polvo.

#### Anillos principales

Los anillos principales A, B y C, y División de Cassini están compuestos por rocas individuales de unos metros de diámetro. Los estudios llevados a cabo muestran que el anillo A es una región con un gran espesor óptico ( $\tau \sim 0.63$ ) y está dividido en dos partes por la división de Encke; tiene un grosor aproximado de entre 10 a 30 metros y es un anillo muy dinámico donde continuamente las rocas se unen atraídas por su propia gravedad, formando cúmulos que luego las fuerzas de marea estirpan y rompen (Flandes, 2012), esto se debe a la cercanía con el límite de Roche. Estos filamentos transitorios de material, llamados wakes (estelas), se observan como sombras o bandas inclinadas, o aun

ondulaciones que indican que las rocas de los anillos están sometidas a fuerzas que las hacen desplazarse en direcciones distintas a sus trayectorias orbitales naturales. El anillo A cuenta con varias ondas de densidad debido a las resonancias de Lindblad con sus lunas cercanas, ésta es la característica principal del anillo.

El anillo B, es probablemente, el anillo que contiene la mayor parte de la masa de todo el sistema de anillos, teniendo un alto espesor óptico ( $\tau > 4$ ). Cuenta con un grosor de entre 5 a 15 metros y es el anillo más ancho y denso donde las rocas están tan cerca entre sí que, en algunas regiones, no permiten el paso de la luz de un lado a otro, porque las rocas se tocan y se traslapan, formando capas; es decir, cuenta con una mayor organización estructural.

El anillo B se caracteriza por tener ondulaciones suaves, que han demostrado tener aproximadamente 25 años. Al igual que en el anillo A, en el anillo B también se presentan wakes y ondas de densidad debido a efectos de la gravedad local.

Los anillos A y B son anillos brillantes, este brillo está fuertemente relacionado con el perfil de profundidad óptica, aunque algunas variaciones de brillo pueden reflejar variaciones en el albedo. Las imágenes de Voyager también revelaron variaciones sutiles pero reales de color en el anillo B. Los más destacados son las dos "bandas rojas" alrededor de 99,000 y 101,000 kilómetros del centro de Saturno y una "banda azul" a 109,000 kilómetros descritos por Estrada y Cuzzi (1996).

El anillo C es muy transparente y se puede ver a través de él. Tiene una anchura de 17,342 km y con un grosor aproximado de 5 metros. Es el anillo más tenue y transparente donde las rocas tienen muy poco contacto entre sí. Se presentan ondas y otras resonancias. Las características del anillo C son muy semejantes a las de la División Cassini.

La división de Cassini se encuentra entre los anillos A y B, cuenta con una anchura de aproximadamente 4637 metros y con un grosor de 1 metro. En esta región prácticamente hay ausencia de partículas, por lo tanto, es muy transparente. Al igual que en el anillo A, en esta región



Figura 1.2: Organización de los anillos visibles de Saturno desde el anillo interno D hasta el anillo externo E. (<http://pendientedemigracion.ucm.es/info/Astrof/users/ncl/lucia-crespo/saturno5>)

se presentan ondas de densidad pero en menor cantidad.

Tanto el anillo C como la división de Cassini cuentan con huecos estrechos y con bandas de brillo uniforme. El anillo C alberga a cinco brechas (donde se tiene una ausencia de partículas) mientras que la División de Cassini tiene ocho. Muchos de estas brechas no están completamente vacías, sino habitadas por rizos estrechos, y algunos otras habitados por formas afiladas, opacas y difusas. El anillo C y la división de Cassini tienen una profundidad óptica muy parecida, con un promedio alrededor de  $\tau = 0.1$  y que rara vez excede de  $\tau = 0.5$  (Dougherty, et al. 2009).

El anillo D es el más cercano al centro de Saturno, está compuesto por rocas y polvo. A pesar de ser muy delgado y apenas perceptible, muestra estructuras en espiral descubiertas por la nave Cassini, y se cree que es una deformación en el anillo.

### **Anillos de polvo**

Los anillos de polvo son llamados así por el tamaño de las partículas que los componen (que son principalmente de tamaño micrométrico). El anillo F cuenta con una anchura de 30 a 500 km, es un anillo excéntrico, inclinado y muy delgado compuesto principalmente tanto de rocas como de polvo. Es probablemente también el anillo más dinámico, pues su estructura puede cambiar en cuestión de horas. Prometeo y Pandora actúan como lunas pastoras para impedir que el anillo se extienda. Con la nave Cassini se pudieron observar nudos, trenzados y torcimientos en este anillo.

El anillo G se encuentra entre los anillos F y E, es un anillo tenue constituido por rocas y polvo. Tiene en su frontera interior un arco de rocas (de uno a varios metros) centrado en la luna Egeón. El polvo de este anillo se debe a impactos de micrometeoritos en Egeón y en las rocas que componen su arco.

El anillo E tiene una anchura aproximada de 300,000 km y se caracteriza por ser un disco difuso de polvo de hielo (de agua) con cantidades pequeñas de silicatos, dióxido de carbono y amoníaco. La parte interna de este anillo ( $\sim 180,000$  km del centro de Saturno) se recarga constantemente de partículas es el polvo de los géiseres de la luna Encelado y, la parte externa ( $\sim 480,000$  km del centro de Saturno), de los impactos de micrometeoritos de la luna Rea y otras lunas más embebidas en este anillo.

### **1.3. Comparación de los anillos de Saturno con otras estructuras anulares**

Durante más de tres siglos, Saturno era el único planeta conocido en poseer anillos. En marzo de 1977, una ocultación de la estrella SAO158687 reveló los estrechos anillos opacos de Urano y lanzó una

edad de oro en la exploración de los anillos planetarios. En 1979, la nave espacial Voyager fue la primera en fotografiar y estudiar el amplio pero tenue sistema de anillos de Júpiter. Fue en 1989 cuando Voyager 2 confirmó la presencia de anillos de polvo alrededor de Neptuno.

Sin embargo, el sistema de anillos de Saturno tiene características que engloban a los sistemas de anillos de Júpiter, Urano y Neptuno (ver Figura 1.3), ya que los anillos de Saturno, al igual que los otros planetas gigantes, están compuestos por innumerables partículas de roca y polvo. A pesar de contar con similitudes, las partículas de los anillos de Saturno tienen un alto albedo, mientras que las partículas de los otros sistemas de anillos son generalmente bastante oscuras (bajo albedo).

El sistema de anillos de Urano está conformado por trece anillos (nombrados por letras griegas: 1986U2R/ $\zeta$ , 6, 5, 4,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$ ,  $\varepsilon$ ,  $\nu$ ,  $\mu$ ) que están constituidos principalmente por partículas de polvo, esto hace que sean oscuros y muy tenues (de Pater, et al. 2006). Entre los anillos se pueden encontrar arcos incompletos. Se cree que la composición principal es hielo (de agua) con algunos compuestos orgánicos añadidos. Los anillos de Urano poseen regiones constituidas por material brillante (hielo de agua) similares a algunas regiones de los anillos de Saturno. También, algunas de sus regiones, pueden compararse con algunos anillos de polvo de Saturno y, al igual que el anillo F, algunos anillos de Urano se encuentran pastoreados por sus lunas cercanas. Voyager 2 descubrió que el anillo más brillante de Urano  $\varepsilon$  está pastoreado por las lunas Cordelia y Ofelia.

Las características principales de los diferentes sistemas de anillos se muestran en la tabla 1.1.

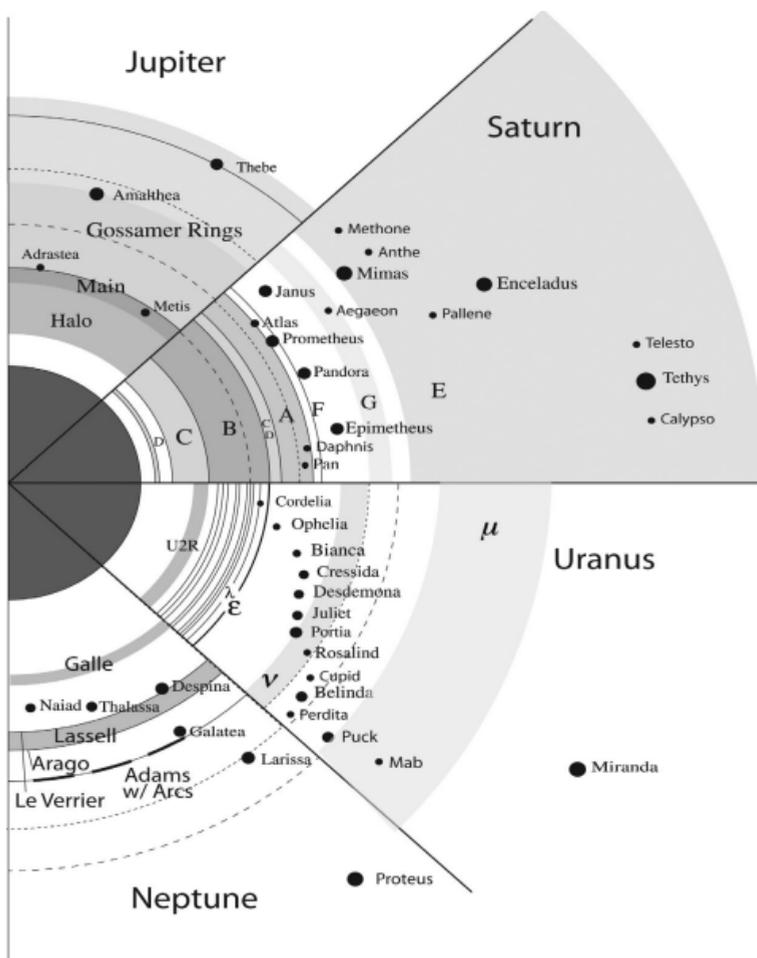


Figura 1.3: Comparación de los cuatro sistemas de anillos planetarios, incluyendo las lunas cercanas, a escala de un radio ecuatorial planetario común. El color más oscuro indica una mayor profundidad óptica en los anillos. (Judith K.B. y Hamilton D. 2001)

## Introducción I

Anillos	Distancia (km)	Profundidad Óptica ( $\tau$ )	Notas
<b>Júpiter</b>			
Halo	92000-122500	$10^{-6}$	Compuestos principalmente de polvo micrométrico (silicatos).
Anillo principal	122000-128980	$3 \times 10^{-6}$	
Amaltea (tenue)	129000-182000	$10^{-7}$	
Tebe (tenue)	129000-226000	$3 \times 10^{-8}$	
<b>Saturno</b>			
D	66000-74658	$10^{-3}$	Anillo más transparente.
C	74658-92000	0.08	
B	92000-117580	2.73	Estructuras abundantes.
División de Cassini	117516-122170	0.15	Varias mesetas.
A	122170-136775	0.63	Densidades de onda, wakes.
F	140200-(A~km)	0.1-0.5	Presenta ondulaciones y trenzados.
G	166000-175000	$10^{-6}$	Anillo de polvo muy tenue.
E	180000-1200000	$10^{-5}$	Alimentado por Encelado.
Febe	60-400 Rs (Rs=60330 km)	$2 \times 10^{-8}$	El más tenue, el más extenso.
<b>Urano</b>			
1986U2R	37000-39500	$10^{-4}$ - $10^{-3}$	Anillos oscuros y tenues. Poseen regiones constituidas por material brillante (hielo de agua).
$\varsigma$	37850-41350	$10^{-3}$	
6	41837	0.3	
5	42234	0.5	
4	42570	0.3	
$\alpha$	44718	0.3	
$\beta$	45661	0.2	
$\eta$	47175	0.3	
$\gamma$	47627	2	
$\delta$	48300	0.4	
$\lambda$	50023	$10^{-3}$	
$\varepsilon$	51149	0.5-2.3	
$\nu$	66100-69900	$6 \times 10^{-6}$	
$\mu$	86000-103000	$8 \times 10^{-6}$	
<b>Neptuno</b>			
Galle	41000-43000	$4$ - $10 \times 10^{-5}$	Estrechos, menos opacos que los anillos de Urano. Primer Sistema en mostrar anillos incompletos (arcos).
Le Verrier	53000 (A=10 km)	$10^{-2}$	
Lassell	53000-58000	$1$ - $3 \times 10^{-4}$	
Arago	57200 (A=100 km)	-	
Adams	62930 (A=50 km)	$10^{-2}$	
Arcos de Adams	62 930 (A=10 km)	$10^{-1}$	

Tabla 1.1: Características principales de los diferentes sistemas de anillos. Fuente: Eposito, L. 2014

El sistema de anillos de Júpiter es extremadamente tenue y está conformado por *los anillos tenues*, un *anillo principal* y un *anillo halo*. Se componen principalmente de polvo micrométrico en el que los silicatos podrían ser el compuesto principal. El anillo principal, por ejemplo, muestra una retrodispersión relativamente brillante que sugiere la presencia de partículas de un tamaño relativamente mayor a los otros (de Pater, et al. 2001). En el anillo principal se han encontrado siete cúmulos de partículas concentrados en ciertas regiones que indican que se pueden deber a las resonancias orbitales con el satélite Metis. Estas estructuras

son muy similares a las formadas en los anillos de Saturno.

El anillo principal y el halo son alimentados por el polvo expulsado de los satélites Metis y Adrastea por los impactos de micrometeoroides (Smith, et al. 1979).

Los anillos de Neptuno se asemejan a los anillo de Urano, ya que son muy estrechos, aunque domina más el polvo y son menos opacos. Neptuno fue el primero en mostrar los anillos incompletos longitudinalmente, llamados arcos de anillo (Miner, et al., 2007). La profundidad óptica en este sistema es muy baja ( $\tau < 0.1$ ) y probablemente se debe a la presencia de compuestos orgánicos.

Aunque hay comparaciones entre los sistemas de anillos, éstos cuentan con estructuras regidas por las resonancias orbitales, además de las interacciones lunas-anillos. Así que no son del todo distintos.

### 1.4. La importancia del estudio de los anillos de Saturno

Los avances tecnológicos han permitido mejores estudios y resultados de los anillos planetarios, los estudios se han diversificado e incluyen un mayor intervalo de longitudes de onda y con mucha mayor precisión que con lo que se contaba previamente.

Con el conocimiento de las estructuras de los anillos se puede dar paso a las teorías de formación, o encontrar cuál de las teorías actuales puede explicar mejor la formación de los anillos.

A su vez, la estructura de los anillos da lugar al conocimiento de las fuerzas que rigen a los anillos, es decir, cuáles son los procesos que le dan forma a los anillos y a su estabilidad.

La dinámica de los anillos de Saturno da paso a la evolución a la

que han estado expuestos, es decir, con el paso del tiempo los anillos pudieron haber sufrido cambios tanto en su estructura como en su composición dando como resultado a los anillos que ahora se observan.

Sin duda, el descubrimiento de estructuras anulares en el sistema solar ha sido uno de los grandes avances científicos en las últimas tres décadas. Ahora se sabe que los anillos son estructuras comunes en el sistema solar y que no sólo todos los planetas gigantes tienen anillos a su alrededor, sino que también algunas lunas de Saturno y Júpiter poseen anillos, al igual que otros cuerpos como Plutón o cuerpos como Chariklo (Figura 1.4). Recientemente se ha sugerido que Marte podría tener dos anillos de polvo debidos a los impactos de fragmentos muy pequeños de asteroides o micrometeoroides en sus dos pequeñas lunas, Fobos y Deimos, como es el caso de los anillos de Júpiter.

Ejemplos notables han sido los descubrimientos del telescopio espacial Hubble y las misiones de la NASA y la ESA, Pioneer, Viajero, Galileo, Ulysses y Cassini que han dedicado parte de sus recursos y tiempo de observación al estudio de los anillos planetarios. Quizás la parte más relevante, desde el punto de vista científico es el hecho de que los anillos planetarios son laboratorios naturales que ayudan a entender los procesos complejos asociados a la formación y evolución de los sistemas planetarios. En general, el estudio de los anillos planetarios involucra, entre otros, aspectos dinámicos, termodinámicos y fotométricos susceptibles de ser aplicados a otros contextos planetarios y astrofísicos más generales. En última instancia, los procesos que se observan en los sistemas de anillos como el de Saturno, reflejan en gran medida, los procesos que dieron origen al propio sistema solar o también procesos que se llevan a cabo en estructuras de mayor escala como las galaxias. Por lo mismo, parte de lo que se pueda aprender de su estudio puede ser extrapolado a esos otros ambientes astrofísicos.

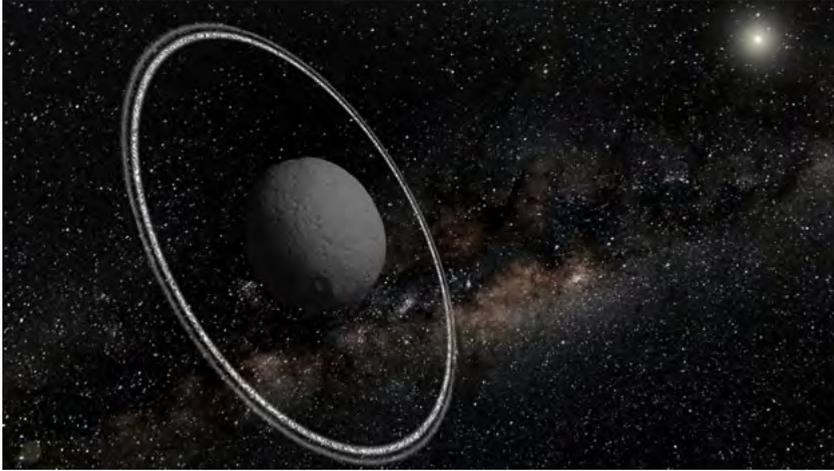


Figura 1.4: Los asteroides pueden tener anillos. En junio de 2013 se descubrieron dos anillos que forman el sistema de anillos del asteroide Chariklo. Esta imagen representan el sistema de anillos. (Maquet L., LESIA)

## Capítulo 2

# Introducción II

En este capítulo se discuten algunos conceptos relevantes para este estudio desde el punto de vista de los anillos planetarios.

### 2.1. La relevancia de los estudios en el infrarrojo

*Todo cuerpo que tenga asociada una temperatura emitirá ondas electromagnéticas. La distribución de energía de esta radiación con longitud de onda es una función de la temperatura de la fuente. El Sol, a una temperatura de más de 5000 K, se irradia sobre todo en longitudes de onda visuales y aparece de color amarillo. En particular, los cuerpos con temperaturas por debajo de pocas centenas de Kelvin, emitirán en la banda infrarroja o térmica comprendida entre unos cuantos micrómetros y pocos miles de micras.*

Asteroides, cometas y planetas irradian en longitudes de onda infrarroja que no pueden ser detectadas por el ojo humano. El análisis de la radiación térmica de un objeto puede decir mucho acerca de su composición y otras propiedades físicas, incluyendo la inercia térmica (o resistencia al cambio de temperatura) o la calidad de sus superficies. La observación de esta radiación a  $10\ \mu\text{m}$  con los telescopios en la superficie de la Tierra se complica por la emisión térmica del propio telescopio y la

atmósfera, las cuales son mucho más brillantes que las que se observan en las fuentes astrofísicas (McFadden, et al. 2007).

Desde 1983, una serie de telescopios que operan en el infrarrojo térmico se lanzaron a la órbita de la Tierra, el primero en lanzarse fue IRAS (por sus siglas en inglés), o Satélite Astronómico Infrarrojo. Las imágenes y otros datos obtenidos han dado como resultado el descubrimiento de nuevos fenómenos en el sistema solar y una nueva perspectiva sobre los procesos dentro de éste. Estas observaciones sólo se habían centrado en los cometas, asteroides y el polvo interplanetario debido a que los principales planetas y la Luna de la Tierra eran demasiado brillantes como para ser observados.

Ahora, las naves espaciales llevan consigo instrumentos capaces de medir en diferentes longitudes de onda dentro del rango del infrarrojo, en el visible y en el ultravioleta para dar mejores resultados. Un ejemplo fue en la primera detección de la emisión térmica de los anillos de Saturno a  $10\ \mu\text{m}$  en 1969 (Allen y Murdock, 1971), donde se obtuvieron numerosas observaciones infrarrojas y, con ellas, se han logrado pasos significativos en la comprensión de las propiedades y la dinámica de los anillos.

## 2.2. Radiación térmica

La radiación emitida por un cuerpo a causa de su temperatura se llama radiación térmica. Los cuerpos nos sólo emiten tal radiación sino que también la absorben de su entorno. Normalmente, llegará a un equilibrio térmico con su entorno. La radiación emitida por un cuerpo “caliente” depende no sólo de la temperatura sino también del material del que está hecho, su forma y la naturaleza de su superficie. Lo anterior hace que el estudio de la radiación térmica sea un tanto complicada. Es por esta razón que se introduce el modelo de radiación de cuerpo negro para hacer el estudio un tanto fácil, en este modelo la radiación emitida por un cuerpo sólo depende de la temperatura y no del material, u otros factores. Existen tres propiedades en la radiación de cuerpo negro, la más importante para este estudio es la llamada *Ley de Stefan-Boltzmann*, en ésta se define la intensidad total de la radiación emitida por un cuerpo

negro. La intensidad de radiación  $I(T)$  es la potencia total irradiada por unidad de área, sumada para todas las longitudes de onda (Resnick, et al. 2001), y se relaciona con la temperatura de la siguiente forma:

$$I(T) = \sigma T^4, \quad (2.1)$$

donde  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  y se define como la *constante de Stefan-Boltzmann*.

Para un cuerpo ordinario su radiación siempre es menos eficiente que la radiación de un cuerpo negro, esto se expresa en la siguiente generalización:

$$I(T) = \varepsilon \sigma T^4, \quad (2.2)$$

donde  $\varepsilon$  es una cantidad adimensional y representa la emisividad de la superficie del cuerpo. Claro, que para un cuerpo negro  $\varepsilon=1$ , pero para las superficies de los cuerpos ordinarios esta emisividad es siempre menor a 1. En este estudio a las partículas que componen a los anillos de Saturno se les trata como cuerpos negros.

### 2.3. Temperatura física y de brillo

Para este estudio es muy importante conocer la diferencia entre la temperatura física y la temperatura de brillo. La temperatura es aquella variable cuyo valor se iguala en dos sistemas que alcanzan el equilibrio térmico (Resnick, et al. 2001). En la termodinámica, se puede introducir la noción de temperatura sólo cuando se está basado en un equilibrio térmico. En un uso cotidiano, la noción subjetiva de la temperatura no es totalmente confiable; en realidad la temperatura no es subjetiva. La medición objetiva de la temperatura de un sistema está basada en la ley cero de la termodinámica, que ha permitido construir y usar los termómetros para su medición.

Para las Ciencias Espaciales existe el concepto de temperatura de brillo, ésta se refiere simplemente a la intensidad de la emisión de un cuerpo, pero medido en la escala de temperatura (K). Para realizar esta

---

medición en unidades de temperatura se hace uso de una “escala equivalente”. Esta escala cuantifica una magnitud difícil de medir usando como referencia otra magnitud más fácil de medir y que esté relacionada con la magnitud de interés. Al usar esta “equivalencia” de temperatura de brillo se está dando la temperatura de un cuerpo negro que emitiese la misma intensidad que el objeto en estudio. Como éste no tiene por qué ser un cuerpo negro, la temperatura de brillo no coincidirá con su temperatura física. Es por esta razón que a la temperatura de brillo también se le puede llamar temperatura aparente. Esta es la temperatura que miden los instrumentos de la nave Cassini.

### 2.4. Albedo

Albedo es uno de los términos más utilizados en las ciencias espaciales para la realización de análisis térmicos de los diferentes cuerpos celestes, además de que ayuda a inferir la composición en los mismos. Existen diferentes tipos de albedos, pero el más utilizado es el albedo de Bond que se define como la proporción existente entre la energía luminosa que incide en una superficie no luminosa (como un planeta o una zona de la superficie planetaria) y la que se refleja. El albedo es igual a la cantidad de luz reflejada de cierta superficie, cuyo rango va de 0 (0%) para una superficie negra que absorbe toda la luz incidente, hasta 1.0 (100%) para una superficie blanca que refleja toda la luz incidente. El albedo puede variar sobre una superficie, por lo que para fines prácticos se utiliza un albedo promedio.

Otros tipos de albedo son el albedo geométrico y el albedo hemisférico. El primero es el cociente entre la luz o cualquier otra radiación reflejada por un objeto, visto desde la dirección del Sol, y la que se reflejaría si ese objeto fuese una esfera reflectora perfecta. El albedo hemisférico en pocas palabras es la fracción de luz que incide sobre un cuerpo no luminoso, y que es difundida por su superficie, como función del ángulo de incidencia (Ridpath, 2004).

---

## 2.5. Profundidad Óptica

Los estudios actuales para conocer más a detalle la estructura interna de los anillos planetarios están basados principalmente en el método de ocultación estelar, que permite deducir la profundidad óptica ( $\tau$ ) de cada anillo y conocer que tan ópticamente transparente u opaco es. La transparencia u opacidad del anillo dependerá de la densidad volumétrica de partículas.

En general, la profundidad óptica ( $\tau$ ) es una medida adimensional de que tan ópticamente transparente es un medio. Es el resultado de cuanta radiación deja pasar un medio cuando éste se coloca entre un observador y una fuente de luz incidente. A este método se le conoce como ocultación estelar.

Se puede hablar de medios ópticamente opacos y ópticamente transparentes:

- Ópticamente opaco ( $\tau \gg 1$ ): cuando la radiación que deja pasar el medio es casi nula debido a la absorción del medio.
- Ópticamente transparente ( $\tau \ll 1$ ): cuando el medio bloquea muy poca radiación.

La profundidad óptica se puede definir de diferentes formas dependiendo del objetivo que se esté llevando a cabo:

- H. Salo y R. Karjalainen, (2003) utilizan simulaciones dinámicas usando un modelo fotométrico (Monte Carlo) para conocer la distribución de las partículas y comprobar si los anillos de Saturno son moderadamente aplanados como lo predicen otras simulaciones dinámicas. En estas simulaciones se utiliza una profundidad óptica dinámica:

$$\tau_{dyn} = \frac{\sum_i \pi s_i^2}{L_x L_y}, \quad (2.3)$$

---

que indica que la superficie total de las partículas  $\sum_i \pi s_i^2$  está dividida por el área de la región de cálculo  $LxLy$ , que es la cantidad básica empleada en los experimentos dinámicos. Este modelo estudia conjuntos de partículas de sistemas verticalmente homogéneos donde las partículas no se superponen, y conjuntos de partículas obtenidos a partir de simulaciones dinámicas, ambos utilizan una distribución de tamaños definidos con una ley de potencias. También se toma en cuenta los diferentes valores del factor de llenado volumétrico  $D$  que corresponden a diferentes espesores de la capa de partículas  $H$

$$D \equiv D_{uni} = \frac{4s}{3H} \tau_{dyn}, \quad (2.4)$$

donde  $s$  es el radio de las partículas.

- Por otro lado, existe el concepto de profundidad óptica normal que se obtiene mediante la observación de ocultaciones estelares y depende no sólo de la cantidad del material en el anillo y de la longitud de la trayectoria del haz ocultado a través del anillo, sino también de la orientación del propio haz (Colwell et al. 2009).

La profundidad óptica normal se calcula con la siguiente ecuación,

$$\tau_n = \mu \ln \left( \frac{I_0}{I - b} \right), \quad (2.5)$$

donde  $I$  es la intensidad medida del haz ocultado,  $I_0$  es la intensidad no ocultada,  $b$  es cualquier señal de fondo y  $\mu = |\sin B|$ , donde  $B$  es el ángulo de inclinación del haz respecto al plano del anillo.

Conociendo la profundidad óptica en cada uno de los anillos principales, se puede deducir tanto estructura como composición de las partículas que los forman.

---

## 2.6. Resonancias

Las resonancias juegan un papel muy importante respecto a la estructura de los anillos, ya que puede agrupar partículas o crear ondas de densidad provocando que ciertas regiones de los anillos tengan distribuciones de partículas diferentes y una mayor profundidad óptica ( $\tau$ ).

La estructura de los anillos en el Sistema Solar se esculpe principalmente por las fuerzas gravitacionales provocadas por los cuerpos que están a su alrededor. Cuando dos cuerpos se ejercen una influencia gravitatoria con variaciones cíclicas se habla de una resonancia orbital. En mecánica celeste, una resonancia orbital se produce cuando las órbitas de dos cuerpos tienen períodos cuyo cociente es una fracción de números enteros.

En los anillos de Saturno, las resonancias pueden causar tanto estabilidad como inestabilidad. Un ejemplo de estabilidad es la resonancia Mimas 5:3 con las partículas del anillo A. Las inestabilidades a causa de una resonancia son las encargadas de abrir huecos o brechas entre los anillos. El ejemplo más grande es la División Cassini, causada por la resonancia de Mimas, Encelado y Tetis con las partículas del borde exterior del anillo B. Se debe a que para cada  $n$ -órbitas de la luna, la partícula del anillo debe dar  $m$ -vueltas exactas, por lo que al cabo del tiempo en que la luna da  $n$ -vueltas se halla a la mínima distancia de la partícula, causando un tirón gravitacional que hace que las órbitas de las partículas dejen de ser circulares, y aumenta la probabilidad de que las partículas choquen con sus vecinas menos perturbadas; es decir, se pierden partículas en la banda situada a la distancia radial correspondiente a la resonancia y se crean los huecos.

Las resonancias de Lindblad son un tipo de resonancias orbitales en la que la frecuencia epicycloidal de un cuerpo (la velocidad a la que un periápside sigue a otro) es un múltiplo entero de cierta frecuencia forzada (Binney y Tremaine, 1988), es decir, el cuerpo está oscilando radialmente a un múltiplo entero de la frecuencia de accionamiento y en una fase constante, lo que representa una condición de oscilación forza-

---

da. Esta oscilación se asemeja a una forma de espiral. Estas resonancias son importantes ya que generan múltiples ondas de densidad que es la característica principal del anillo A como se observa en la Figura 2.1. En las regiones donde ocurren estas resonancias, la profundidad óptica es mayor, debido a las ondas de densidad que se generan (alta densidad de partículas).

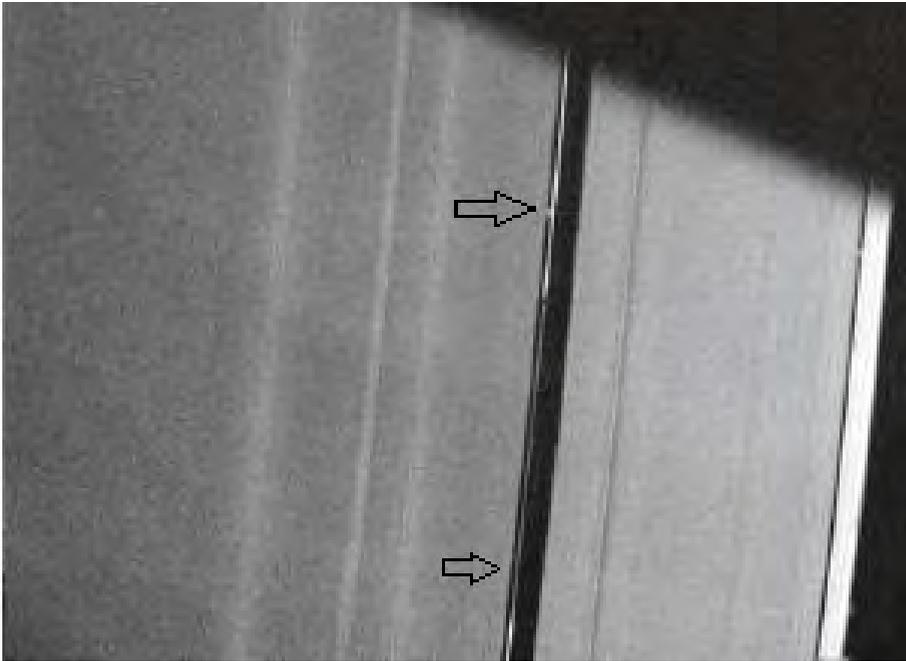


Figura 2.1: Porción de los anillos tomada por Voyager que muestra una prominente densidad espiral y ondas de flexión en la división de Encke en el anillo A. (JPL PIA01952).

---

## Capítulo 3

# La Misión Cassini y el espectrómetro CIRS

La misión Cassini - Huygens es un proyecto internacional de la NASA, ESA y ASI, comprende dos naves: la nave espacial Cassini, orbitador de Saturno, y la sonda Huygens, que entró en la atmósfera de la luna más grande de Saturno, Titán. El objetivo general de la misión es estudiar todo el sistema de Saturno: al propio planeta, su atmósfera y su magnetosfera, sus satélites (lunas) y su sistema de anillos y las interacciones entre éstos. La misión Cassini fue lanzada el 15 de Octubre de 1997 y entró en órbita alrededor de Saturno en julio del 2004. La primera etapa de la misión Cassini - Huygens concluyó el 12 de agosto de 2009 cuando ocurrió el equinoccio más reciente en Saturno. Durante la segunda etapa, denominada Misión solsticio, la nave simplemente esperará el siguiente solsticio saturniano, que ocurrirá en 2017 (Flandes et al. 2010).

La misión Cassini puede "ver" en longitudes invisibles para el ojo humano (por ejemplo en radio, infrarrojo y ultravioleta); puede "percibir" los campos magnéticos, así como diminutas partículas de polvo, todo esto a través de doce instrumentos. A estos instrumentos los podemos dividir en instrumentos que analizan campos magnéticos, partículas energéticas y de polvo, y ondas electromagnéticas. Este último grupo tiene como objetivo principal estudiar a los anillos y a las lunas de Saturno. En este último grupo es donde se encuentra el espectrómetro CIRS (por

su siglas en inglés, Composite Infrared Spectrometer o Espectrómetro Compuesto Infrarrojo) que ha dedicado una buena parte de su atención a los anillos principales. Los datos que se utilizan en esta tesis son de este instrumento.

### 3.1. Los predecesores de CIRS (IRIS)

El instrumento precursor del CIRS es el espectrómetro IRIS (por sus siglas en inglés o, en español, Espectrómetro Interferómetro infrarrojo y Radiómetro) que aún están a bordo de las naves de la Misión Voyager que fue lanzada en 1977 y tenía como principal objetivo explorar Júpiter y Saturno, aunque el Voyager 2 continuó con la exploración de Urano y Neptuno. Actualmente la misión se ha extendido y es llamada Misión Voyager Interestelar (VIM) y su objetivo es explorar el borde más exterior del dominio del Sol, y más allá. Uno de los objetivos principales del IRIS era determinar la estructura térmica vertical de la atmósfera de los planetas externos, medir abundancias de hidrógeno y helio para comprobar las teorías sobre el origen y evolución de la nebulosa solar primitiva para ayudar a investigar el origen y la evolución planetaria (Simon-Miller et al. 2006).

IRIS combina un interferómetro de Michelson para mediciones en la zona del infrarrojo medio ( $180$  a  $2500\text{ cm}^{-1}$ ), con una resolución espectral de  $4.3\text{ cm}^{-1}$ , y un radiómetro para mediciones en el rango visible e infrarrojo cercano ( $5000$  a  $30000\text{ cm}^{-1}$ ), compartiendo un telescopio Cassegrain con un espejo primario de  $50\text{ cm}$  de diámetro y un campo de visión de  $0.25^\circ$  (Hanel et al. 1980). De acuerdo a la ficha técnica de la NASA ([http://voyager.jpl.nasa.gov/spacecraft/instruments\\_iris.html](http://voyager.jpl.nasa.gov/spacecraft/instruments_iris.html)), IRIS actúa como tres instrumentos separados. Primero, es un termómetro muy sofisticado que puede determinar la distribución de energía térmica que emite la materia, lo que permite determinar la temperatura de ese objeto. En segundo lugar, es un instrumento que puede determinar cuándo ciertos tipos de elementos o compuestos están presentes en una atmósfera o sobre una superficie. En tercer lugar, utiliza un radiómetro separado para medir la cantidad total de luz solar reflejada por un cuerpo en frecuencias ultravioleta, visible, e infrarrojas (ver Figura

3.1)

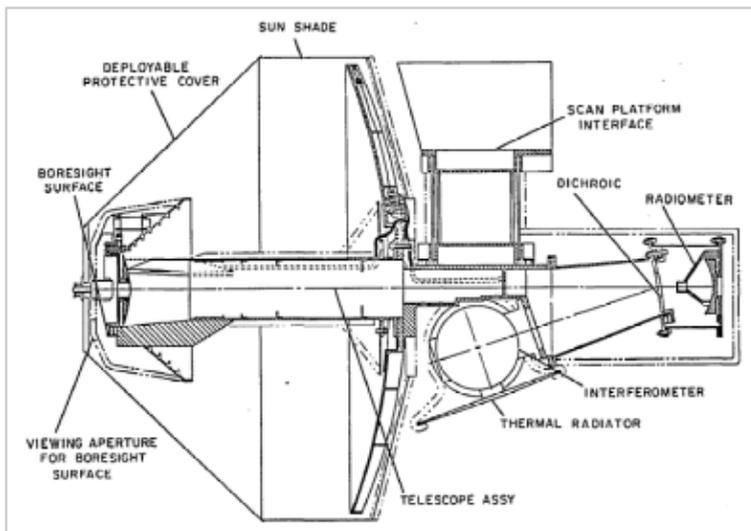


Figura 3.1: Configuración del instrumento IRIS de las naves Voyager (NASA/JPL)

### 3.2. El espectrómetro de CIRS

Los espectrómetros son instrumentos que descomponen y miden las propiedades de la luz (o radiación electromagnética) que reciben de los cuerpos con el fin de identificar su composición. El espectrómetro CIRS comparte los principios básicos del IRIS. Ambos cuentan con interferómetros de Michelson que obtienen un espectro de temperaturas. Aunque con IRIS se hicieron descubrimientos fundamentales en torno a los anillos de Saturno (observaciones mostraron que la temperatura de los anillos varía con la distancia radial y, en general, con la geometría de observación). IRIS es fuertemente sensible a los errores sistemáticos y con CIRS se trató de corregir estos errores.

El objetivo principal de CIRS es medir la emisión infrarroja de la atmósfera de Saturno y de algunas de sus lunas, de los anillos y también

de las superficies de las lunas para determinar sus temperaturas y las variaciones de éstas y, a partir de estas variaciones determinar su composición. CIRS compone mapas de temperaturas, tanto de los anillos, como de Saturno y sus lunas y con estos mapas, se busca entender mejor estos cuerpos y los procesos asociados a ellos (Spilker et al. 2005).

CIRS tiene un peso de alrededor de 40kg y tiene un tamaño aproximado de medio metro de altura. Consta de dos espectrómetros de Fourier, que en conjunto miden emisión térmica de longitudes de onda de 1400 a  $10\text{ cm}^{-1}$  (7 y  $1000\text{ }\mu\text{m}$ ) a una resolución espectral programable de 0.5 a  $15.5\text{ cm}^{-1}$  (Flandes et al. 2010). Los espectrómetros de Fourier fueron diseñados con el objetivo de acceder a la región del infrarrojo lejano, y su funcionamiento está basado en el mismo principio del interferómetro de Michelson en los que la radiación incide en un separador que divide la luz en dos partes iguales; una es transmitida en la misma dirección y la otra es reflejada perpendicularmente. Ambos haces, son luego reflejados de vuelta al punto de bifurcación donde se superponen. La superposición de las dos partes es medida como una función de desfase y la transformada de Fourier usa la suma de senos y cosenos para el desarrollo de un interferograma, éste es el resultado que se muestra como un espectro.

CIRS consta de tres interferómetros; el interferómetro infrarrojo lejano cubre el rango espectral de  $17\text{ }\mu\text{m}$  a 1 mm y es un interferómetro que polariza la radiación y posteriormente la modula, este interferómetro enfoca su salida en el plano focal 1 (FP1) (<https://saturn.jpl.nasa.gov/composite-infrared-spectrometer/>). El interferómetro infrarrojo medio cubre el rango espectral de 7-  $17\text{ }\mu\text{m}$  en dos bandas y es un interferómetro de Michelson convencional, la primera banda ( $9\text{-}17\text{ }\mu\text{m}$ ) es proyectada en una matriz fotoconductor de  $1\times 10$ , y la segunda banda ( $7\text{-}9\text{ }\mu\text{m}$ ) es proyectada en una matriz fotovoltaica de  $1\times 10$  de  $1.2^\circ$  pixeles. Sus salidas son enfocadas en los planos focales 3 y 4 (FP3 Y FP4), respectivamente (Flasar et al., 2004). El interferómetro de referencia es un instrumento Michelson que proporciona sincronización de correlación de la toma de muestras de datos científicos a la posición del mecanismo de escaneo, y que se utiliza en el eje del centro óptico del interferómetro infrarrojo

medio (como se muestra en [3.4](#)).

Los anillos principales de Saturno, en los que se concentra esta tesis, reflejan, en promedio, la mitad de la energía que reciben. La energía que absorben los calienta hasta que alcanzan una temperatura de equilibrio de entre 40 y 120 K, por lo que emiten en el infrarrojo y, por lo tanto, el CIRS es el instrumento ideal para su estudio.

El instrumento CIRS y su configuración se muestran en las figuras [3.2](#) y [3.3](#).



Figura 3.2: Instrumento CIRS de la nave Cassini (NASA/JPL)

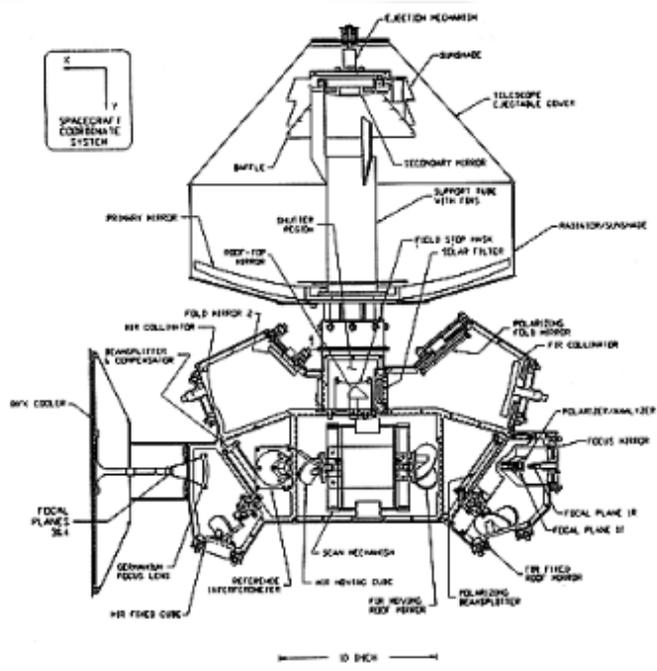


Figura 3.3: Configuración del instrumento CIRS de la nave Cassini (Virgil G./NASA/JPL)

### 3.3. La Física detrás de CIRS

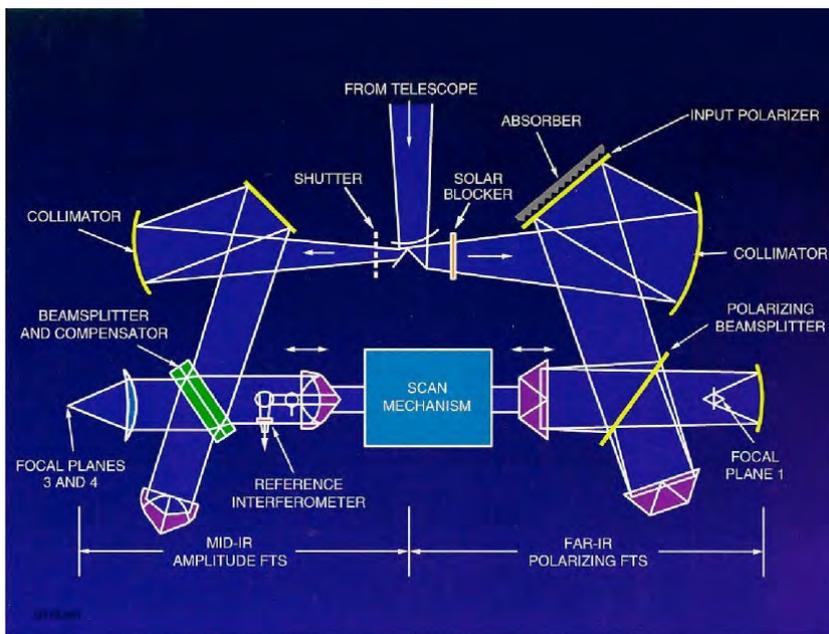


Figura 3.4: Ensamblaje interno de CIRS (NASA/JPL)

CIRS estima la temperatura de una región de estudio dada a partir de los espectros de siete diferentes puntos que forman un polígono que compone su campo de visión. En estos puntos se estima la temperatura suponiendo que la región observada se comporta como un cuerpo negro. El software del instrumento hace un promedio de las siete temperaturas y esa es la temperatura que se asocia al campo de visión o también en el centro de ese polígono. A partir de las mediciones de temperatura se puede estimar tanto la estructura, como la dinámica y la composición de los anillos principales de Saturno. Por ejemplo, en la estimación de la composición se considera que los diferentes materiales que conforman a los anillos reaccionan de manera distinta a los cambios de temperatura o, en el caso de la estructura o la dinámica (de los anillos o de las mismas partículas), se considera que las diferentes formas en que la luz

es reflejada o eclipsada. Se hablará con más detalles de estos aspectos en los capítulos siguientes.

Cada región de los anillos contienen partículas que debido a su posición respecto al Sol tienen diferentes temperaturas, y su emisión superpuesta produce un sólo espectro. Como resultado, todos los espectros analizados por CIRS se asemejan a funciones de Planck,  $B(\lambda, T)$ , donde la relación en términos de una temperatura representativa,  $T$ , de una intensidad observada,  $I(k)$  y de un factor de llenado  $\beta$  (emisividad neta de la estructura de los anillos con rango de 0 a 1) es:

$$I(k) = \beta B(k, T). \quad (3.1)$$

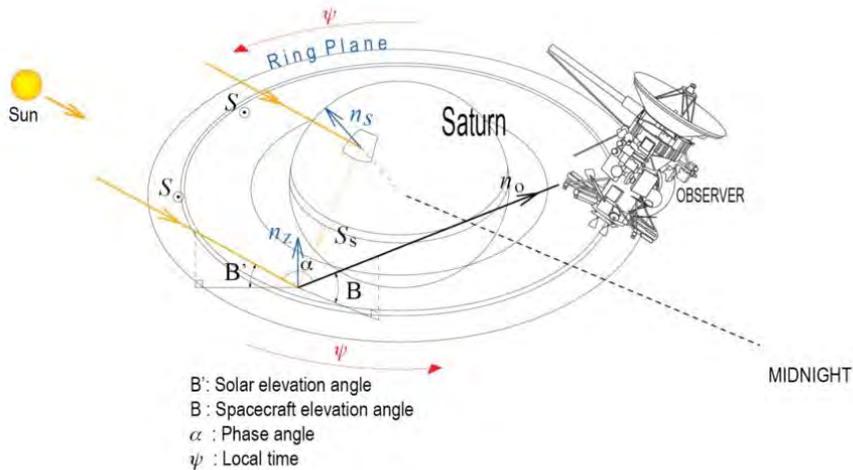
Aquí, la función de Planck está relacionada con el campo de visión, que está emitiendo a una temperatura  $T$  y  $k$  es el número de onda ( $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ) (Flandes et al. 2010).

### 3.4. Geometría de las observaciones

La primera etapa de la misión Cassini – Huygens concluyó el 12 de agosto de 2009 cuando ocurrió el equinoccio más reciente en Saturno. Durante la segunda etapa, denominada Misión solsticio, la nave simplemente esperará el siguiente solsticio saturniano, que ocurrirá en 2017 (Flandes, 2012). El interés de los equinoccios y los solsticios de Saturno se basa principalmente en la orientación de los anillos respecto al Sol. Antes de llegar al equinoccio, los anillos se van inclinando respecto al Sol hasta llegar a una posición de canto (equinoccio), esto ocurre cuando el eje del planeta no está inclinado y los anillos son casi invisibles.

Los anillos absorben y reflejan radiación que les llega de diferentes cuerpos; por ejemplo de Saturno y del Sol. Las diferentes inclinaciones de los anillos provocan una variación de la luz que les llega del Sol, por lo tanto, su temperatura también va cambiando. Es decir, hay una variación de temperatura desde el solsticio hasta el equinoccio. Fuera del equinoccio los anillos siempre exhiben un lado iluminado más caliente y uno oscuro (o no iluminado) más frío (Flandes, 2012).

La emisión térmica de los anillos es una función compleja en la que inciden, tanto las propiedades físicas de las partículas que componen a los anillos (p. e., conductividad térmica, distribución de tamaño, velocidad de rotación), así como la estructura o distribución vertical del disco y aún la geometría de observación (Ferrari y Leyrat, 2006; Spilker et al. 2003). Sin embargo, la fricción o interacción entre las partículas vecinas a través de las colisiones también tienen un efecto relevante pues disipan energía y también pueden transformar la energía cinética orbital de las partículas en energía rotacional. La rotación de las partículas incide en la forma en que las partículas alcanzan el equilibrio térmico. En general, podemos decir que la respuesta térmica de una partícula dada de los anillos principales, que recibe la radiación directa del Sol, de Saturno y de las partículas vecinas, es dictada aún más por el albedo de la partícula, su tasa de rotación y la inercia térmica ( $\Gamma$ ), o de la posible regolita que cubra su superficie. En un esquema simple, si  $\Gamma$  es alta (es decir, resistente a los cambios de temperatura) o si la partícula está girando rápidamente, su superficie total será casi isotérmica. A la inversa, un rotador lento con una baja inercia térmica presentará un fuerte gradiente térmico entre el hemisferio calentado por el sol y el hemisferio opuesto: la emisión térmica dependerá entonces del ángulo de fase (Leyrat et al. 2007). Este estudio toma mediciones de temperaturas de CIRS obtenidas en la primera etapa de la misión Cassini. Estas temperaturas dependen fuertemente de los parámetros geométricos de observación. Los parámetros básicos se muestran en la Figura (3.5) y se describen a continuación:



A. Flandes, Watching the Sun set on Saturn's Rings, JPL, Enero 7, 2010.

Figura 3.5: Geometría básica de las observaciones de la nave Cassini (A. Flandes/JPL).

1. Ángulo de elevación solar ( $B'$ ): El ángulo de elevación solar se define entre el plano de los anillos y el vector que une Saturno con el Sol.  $B' < 0^\circ$  hacia el sur del plano de los anillos. Cuando la nave Cassini entró en órbita alrededor de Saturno, el Sol iluminaba el lado sur, por lo tanto  $B' < 0^\circ$ . En septiembre de 2009,  $B' = 0^\circ$ , pues fue en esta fecha el equinoccio. Después de 2009,  $B' > 0^\circ$ , de modo que el norte de los anillos era el que estaba iluminado.
2. Ángulo de elevación de la nave ( $B$ ): es el ángulo entre el plano de los anillos y el vector de posición de la nave Cassini. Su rango va de  $[-90^\circ, 90^\circ]$ , donde  $90^\circ$  indica la dirección del polo norte y  $-90^\circ$  indica la dirección del polo sur.
3. Ángulo de fase ( $\alpha$ ): es el ángulo entre el vector radial de la nave Cassini y el vector radial del Sol desde el centro de cada campo de visión. Su rango es de  $[0^\circ, 180^\circ]$ .
4. Ángulo de tiempo local ( $\Psi$ ): Es el ángulo azimutal con respecto

al centro de Saturno que ubica una posición dada sobre el plano de los anillos. De acuerdo a la convención,  $0 h$  está en el sentido contrario a la dirección solar y  $12 h$  o mediodía apunta hacia el Sol. Los ángulos se miden en sentido opuesto a las manecillas del reloj.

### 3.5. Datos obtenidos por CIRS en Saturno

Los resultados de la primera etapa de la misión Cassini-Huygens han ayudado a delimitar y mejorar la comprensión de la formación y evolución del sistema de Saturno (lo que incluye a sus anillos y satélites). Por ejemplo, el fuerte enriquecimiento en carbono durante abundancias solares, ahora confirmados por Cassini, motiva las teorías de la inestabilidad del gas y modelos básicos de formación de acreción (Flasar, 2014). Algunas observaciones recientes sugieren que el sistema de anillos de Saturno puede ser más masivo y antiguo de lo que se pensaba.

Uno de los resultados más interesantes que se ha logrado gracias al espectrómetro CIRS, es el descubrimiento de grietas calientes en el polo sur de la luna Encelado y la emisión de Jets de vapor y polvo a través de ellas. Las grietas fueron vistas por las cámaras de Cassini (ISS), pero CIRS fue capaz de decir que son mucho más calientes que su entorno. Otro aspecto importante es la detección de la abundancia de metano y mapas de amoníaco en la atmósfera superior de Saturno.

Respecto a los anillos de Saturno, CIRS ha colaborado con mejorar la comprensión en estructura, dinámica y composición de los mismos, gracias a la amplia gama de geometrías en los cuales se han estudiado. Esto ha permitido, por primera vez, una exploración detallada de estructuras radial y vertical de los anillos principales en las diferentes longitudes de onda (Dougherty et al. 2009). El comportamiento térmico de los anillos, obtenido con mapas sucesivos de temperatura ha contribuido al entendimiento de la estructura y dinámica de los anillos. También se ha identificado la existencia de una población de partículas en los anillos principales que son relativamente grandes, que giran lentamente y que tienen una inercia térmica lo suficientemente baja para

proporcionar una respuesta térmica que es rápida en comparación con el período de rotación de las partículas (Flasar, 2014). Otro hallazgo es la determinación de las temperaturas mínimas de los anillos, detectadas durante el equinoccio y las modulaciones de las temperaturas en el anillo A causadas por la auto gravedad.

Con la Misión solsticio se pretende estudiar los cambios en la estructura de los anillos, debidos a la fuerza gravitacional que ejercen las lunas cercanas y que pueden cambiar la estructura en escala de tiempo de años.

CIRS ha proporcionado una inmensa cantidad de datos de la primera etapa de la misión, que hasta la fecha, se siguen analizando para poder ayudar a determinar, con mayor precisión, la estructura, la dinámica y la composición de los anillos.

## Capítulo 4

# Modelos térmicos para los anillos principales

Las partículas que conforman a los anillos principales son relativamente pequeñas ( $\approx 1\text{ m}$ ) y, en muchos casos, son muy dinámicas y se encuentran tan juntas que es imposible saber con exactitud la verdadera estructura interna que tiene cada anillo. Existen varios modelos térmicos que intentan describir la estructura de los anillos principales. Estos modelos están basados principalmente en los datos obtenidos con los diferentes instrumentos a bordo de naves como los Voyager, Galileo y Cassini.

En esta tesis se consideran tres modelos como referencia. El primero, supone que las partículas están confinadas en un mismo plano (el plano de los anillos) o una *monocapa*. El segundo supone que las partículas se agrupan verticalmente en capas sucesivas o una *multicapa*. El tercer modelo es la combinación de los dos primeros modelos, mencionando que la transparencia de los anillos se puede deber a estructura tipo monocapa y la opacidad a una estructura tipo multicapa. En realidad, la mayoría de los autores están de acuerdo en que en ciertas regiones de los anillos, las partículas se encuentran en una monocapa y en otras regiones, en una multicapa.

Los modelos toman en cuenta diferentes parámetros para obtener re-

sultados más realistas y coincidentes con los datos obtenidos de Saturno con las naves o los telescopios. Estos parámetros incluyen por ejemplo las profundidades ópticas de las regiones del anillo que se estudie y los índices de las leyes de potencias que describen los tamaños dados de las partículas. A continuación se describe cada uno de los modelos térmicos para los anillos principales mencionados arriba.

### 4.1. Monocapa (L. Froidevaux)

En 1981, Lucien Froidevaux propuso un modelo térmico básico para los tres anillos principales de Saturno A, B y C, y comparó sus resultados con los datos obtenidos en una longitud de onda de  $20\mu\text{m}$  (conjunto de datos bastante completos) por la nave Pioneer 11. El modelo se basa en las variaciones en la temperatura del brillo de los anillos en el infrarrojo. Froidevaux reproduce las variaciones de temperatura como una función de la elevación solar  $B'$  con respecto al plano del anillo.

Froidevaux hace el cálculo del balance de radiación de la temperatura física de las partículas en equilibrio con la radiación emitida por el Sol, Saturno y las partículas vecinas. De esta forma, los resultados de temperatura de brillo arrojadas por el modelo son computarizados en función del ángulo de iluminación ( $B'$ ) y, posteriormente comparados con los datos disponibles básicamente de las misiones Voyager.

El modelo depende fuertemente de la llamada *Función de sombra* que describe las variaciones de fracciones iluminadas y sombreadas de las partículas como función del ángulo de iluminación considerando el eclipsamiento mútuo entre las partículas de los anillos. La función la obtiene experimentalmente colocando una distribución uniforme de esferas sobre una superficie plana e iluminando con una lámpara que simula el Sol (Figura 4.1). Específicamente, utiliza la hipótesis de que las partículas de los anillos son esféricas (con radio  $r$ ), idénticas y equidistantes (separadas por una distancia  $2a$ ). La principal diferencia en las propiedades de las diferentes regiones de los anillos es la profundidad óptica ( $\tau$ ).

La función de sombreado o función  $C(B', \alpha_s)$  ó  $C(B', \tau)$  se define

como sigue:

$$C(B, \alpha_s) = 1 - \left(\frac{2}{\pi}\right) \left( \arccos [\beta(B, \alpha_s)] - \beta(B, \alpha_s) [1 - \beta^2(B, \alpha_s)]^{\frac{1}{2}} \right), \quad (4.1)$$

donde:

$$\beta(B, \alpha_s) = \alpha_s \sin B = \left(\frac{a_s}{r}\right) \sin B, \quad (4.2)$$

y

$$\alpha = \frac{a}{r}. \quad (4.3)$$

En la Figura (4.1) se observa el arreglo experimental del modelo de monocapa del anillo C con profundidad óptica de  $\tau = 0.08$ , donde la proyección de una abertura circular en el plano de los anillos es una elipse (Froidevaux, 1981). Se muestran las dos configuraciones extremas de sombreado. (a) Máximo sombreado:  $\frac{a_s}{r} = \frac{a}{r} = (10)^{\frac{1}{2}}$ , la partícula 2 se ve sombreada por la partícula 3 y el observador ve agujeros entre cada partícula. (b) Mínimo sombreado:  $\frac{a_s}{r} = \left(\frac{a}{r}\right)^2 = 10$ , la partícula 2 es sombreada (mucho menos) por la partícula 1 y no hay agujeros entre las columnas.

Los modelos describen el comportamiento de los anillos considerando el comportamiento de las partículas individuales. Así, la temperatura de una partícula de los anillos se puede obtener de la suma de los flujos de radiación recibidos de las diferentes fuentes. La principal fuente es el Sol (visible), pero también son relevantes la radiación infrarroja emitida por Saturno y la luz solar reflejada en su atmósfera, así como la energía recibida de las partículas vecinas. Los flujos quedan modulados por la geometría de observación y la estructura de la región donde se halle la partícula caracterizada por la profundidad óptica.

El modelo de Froidevaux no descarta que un anillo de múltiples capas produce un comportamiento de infrarrojos (como una función del ángulo de inclinación) similar a la de una monocapa. Los resultados

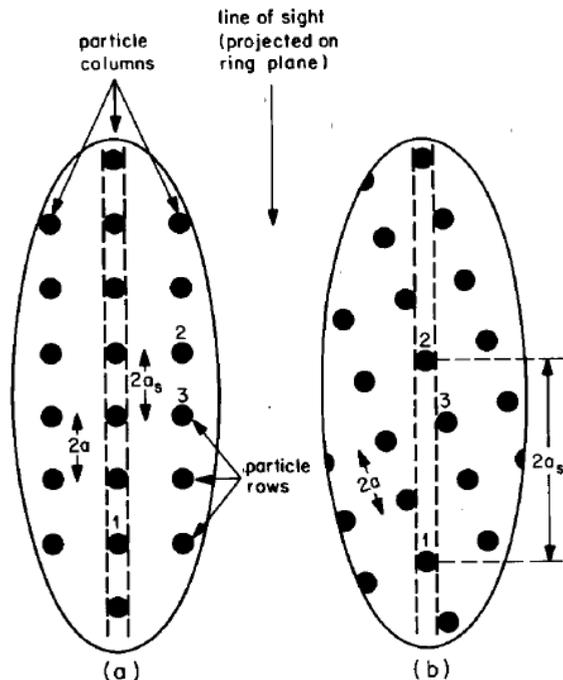


Figura 4.1: Máximo y mínimo sombreado entre las partículas del anillo C (Froidevaux, 1981)

del modelo de monocapa coinciden con las temperaturas observadas en infrarrojo por los Voyager y las observaciones telescópicas de la época (aunque sólo a ángulos de fase pequeños,  $< 10^\circ$ ).

## 4.2. Multicapa (Y. Kawata y W.M. Irvine)

Antes de que Froidevaux hiciera la propuesta del modelo de monocapa, Yoshiyuki Kawata y William M. Irvine en 1975 propusieron un modelo térmico para el anillo B, en el cual consideran que las partículas del anillo no están distribuidas en un sólo plano, están en múltiples capas homogéneas. El modelo incluye el mecanismo de sombreado, funciones de fase realistas para la dispersión múltiple de las partículas del anillo,

y los efectos de la dispersión múltiple y una dispersión del tamaño de la partícula (Kawata Irvine, 1975), para la dispersión del tamaño de las partículas se usa la ley de potencia:

$$dn \propto p^{-s}, \quad (4.4)$$

donde  $dn$  es el número de partículas con radios entre  $p$  y  $p+dn$ .

Para calcular la temperatura de brillo se incluye la solución de la ecuación de transporte radiativo en el infrarrojo para los anillos, lo que representa tomar en cuenta el calentamiento mútuo entre las partículas, así como el calentamiento por la radiación solar y la radiación de Saturno.

Este modelo de multicapa tiene cierta complejidad matemática, es por esta razón que se simplifica asumiendo que las capas son homogéneas. La temperatura de brillo del anillo B se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$B_\lambda(T^*) = \frac{1}{\mu_0} \int_0^\tau d\zeta e^{-\frac{\zeta}{\mu_0}} B_\lambda \left[ T^{\odot+D+h}(\zeta, \mu_0) \right]. \quad (4.5)$$

La ecuación anterior no es más que la función de Planck para la temperatura, donde la integral toma en cuenta la distribución de temperatura que incluye las tres fuentes diferentes de calentamiento, el Sol, Saturno, y el calentamiento mutuo dentro de la capa de anillo. Se indica explícitamente la dependencia de la longitud de onda  $\lambda$  y de la profundidad óptica,  $\tau$ .

Kawata e Irvine concluyen que si las partículas del anillo B son pequeñas y por lo tanto de rotación rápida, es difícil que coincida con las temperaturas de brillo observadas en el infrarrojo si se utiliza un modelo de monocapa. Por otro lado, la coincidencia entre el modelo de monocapa y los datos en infrarrojo sería posible si las partículas del anillo están girando de forma sincronizada, y por lo tanto emiten radiación térmica principalmente de sólo una fracción de su área de superficie.

Cuzzi et al. (1979), proporcionan algún apoyo teórico para el modelo de múltiples capas, mostrando que las partículas pequeñas pueden

ser dispersadas por la gravedad en varias capas sobre un grupo más estable de partículas grandes; un espesor de decenas de metros podría mantenerse en un estado constante durante la vida del Sistema Solar.

### 4.3. Modelos recientes (A. Flandes, H. Salo y R. Morishima)

Más recientemente se ha propuesto otros modelos que toman en cuenta otros parámetros y procedimientos para obtener la estructura interna de los anillos de Saturno, pero siempre tomando en cuenta la emisión térmica en infrarrojo de los anillos.

En 2003, Heikki Salo y Raine Karjalainen utilizan *simulaciones dinámicas* usando un modelo fotométrico (Monte Carlo) para conocer las propiedades de dispersión de las partículas con factores de llenado del volumen en el intervalo  $D=0.001 - 0.3$ , y comprobar si los anillos de Saturno son moderadamente aplanados como lo predicen otras simulaciones dinámicas y si son consistentes con las propiedades fotométricas de los anillos observadas en tierra, incluyendo el brillo cerca de ángulo de fase cero (efecto de oposición), y el brillo del anillo B al aumentar el ángulo de elevación (efecto de inclinación) (Salo y Karjalainen, 2003).

A diferencia del modelo de Froidevoix donde se utiliza la profundidad óptica normal, en estas simulaciones se utiliza una profundidad óptica dinámica en la cual se considera la superficie total de las partículas  $\sum_i \pi s_i^2$  dividida por el área de la región de cálculo  $L_x L_y$ . La profundidad óptica dinámica se define como:

$$\tau_{dyn} = \frac{\sum_i \pi s_i^2}{L_x L_y}. \quad (4.6)$$

Para estudiar conjuntos de partículas obtenidos a partir de simulaciones dinámicas, utilizan una distribución de tamaños definidos con una ley de potencias que depende de cada anillo (por ejemplo, en promedio el índice es  $q = 3$ ). También se toman en cuenta los diferentes valores del

factor de llenado volumétrico  $D$  que corresponden a diferentes espesores,  $H$ , de cada capa de las partículas:

$$D \equiv D_{uni} = \frac{4s}{3H} \tau_{dyn}, \quad (4.7)$$

donde  $s$  es el radio de las partículas.

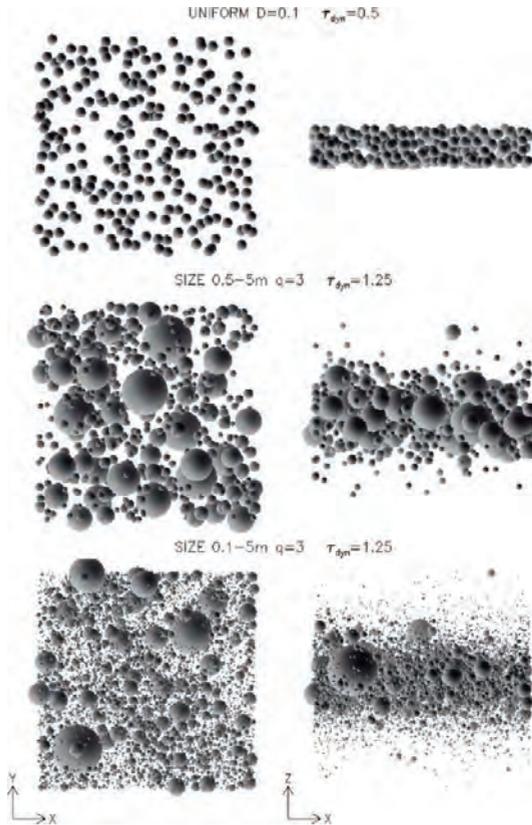


Figura 4.2: Ejemplos de distribuciones de las partículas utilizados en los cálculos fotométricos (Salo y Karjalainen, 2003).

En la Figura (4.2) se muestran ejemplos de distribuciones de 200,000 partículas utilizadas en los cálculos fotométricos. En la parte de arriba se muestra un sistema homogéneo proyectado en el plano ecuatorial con una *densidad de volumen*,  $D = 0.1$  (o en inglés *filling factor*).

Son varios los resultados de estas simulaciones, los más destacados son los siguientes: para ángulos de fase altos ( $\alpha > 30^\circ$ ), dominados por la dispersión múltiple, el brillo se redujo ligeramente, aunque la distribución del tamaño por la ley de potencias disminuye este efecto. El sombreado entre las partículas es un factor que se debe tomar en cuenta en el modelo ya que puede ayudar a establecer

restricciones tanto para la distribución del tamaño de las partículas

como para la elasticidad de las mismas.

Con  $D$  distinto de 0, se puede ayudar a adaptar los ángulos de elevación de fase  $\alpha$  grandes y pequeños para coincidir con las observaciones de Voyager en el interior del anillo A. Las resonancias en el anillo A parecen indicar diferencias locales tanto en la distribución del tamaño como en el espesor óptico. Por último, el modelo de Salo y Karjalainen (2003), concluye que hay una correlación entre el espesor óptico y el brillo del anillo cuando hay ángulos de fase pequeños y partículas idénticas con gran  $D$ , pero este efecto desaparece cuando hay una distribución mayor en las partículas y para  $\alpha$  grandes.

En 2009, Ryuji Morishima, Heikki Salo y Keiji Ohtsuki presentan un nuevo modelo para la emisión infrarroja térmica de los anillos principales (A, B y C) de Saturno basada en una aproximación de multicapa. En este modelo se resuelve la ecuación de transferencia radiativa clásica (válida cuando la distancia entre las partículas es mucho más grande que el tamaño de las partículas) tanto para la luz visible como infrarroja. El modelo toma en cuenta la heterogeneidad vertical de las frecuencias de rotación de las partículas de los anillos y el transporte de calor debido al movimiento de las partículas en direcciones verticales y azimutales. Se adopta una distribución de tamaño bimodal en el cual las partículas pequeñas con rotación rápida con inclinaciones orbitales grandes tienen temperaturas de simetría esférica, mientras no roten las partículas grandes (Morishima et al. 2009). En este modelo, los parámetros físicos más importantes que se toman en cuenta para la estimación de la temperatura de los anillos son el albedo en la luz visible, la fracción de las partículas que giran rápidamente (o *rotadores rápidos*), la profundidad óptica, y la inercia térmica. En el caso del anillo C se tomó una fracción de rotadores lentos para que el albedo sea positivo y se puedan hacer comparaciones terrestres. Para los anillos A y B se necesita que la fracción de rotadores rápidos no se igual a cero para aumentar su temperatura de brillo cuando aumente el ángulo de elevación solar.

De acuerdo al modelo, se considera la luz visible e infrarroja integrada sobre longitudes de onda en cada rango cuando se resuelve la

ecuación de transferencia radiativa. Se puede tratar la función de Planck para la temperatura dada por la luz visible, emitida por el Sol sobre los anillos; y para la temperatura de Saturno o de las partículas de los anillos como la intensidad de la luz infrarroja, se considera una luz infrarroja dispersa (albedo infrarrojo igual a cero). Cuando los anillos son ópticamente delgados se considera que los anillos son uniformes en la dirección horizontal, y se utiliza la distribución de Rayleigh para conocer la distribución de las inclinaciones orbitales de las partículas en cada tamaño. Para los anillos ópticamente gruesos ya no se puede utilizar la distribución de Rayleigh y los anillos ya no son uniformes en direcciones horizontales debido a estelas auto gravitacionales (*wakes*) o a las oscilaciones asimétricas causadas por sobreestabilidades viscosas en los anillos (Morishima et al. 2009).

Este modelo contribuyó con la demostración de que el aumento de la temperatura con el ángulo de elevación solar se mejora debido al transporte vertical del calor, la heterogeneidad vertical de la rotación de las partículas, y el calentamiento mutuo y la dispersión múltiple de la luz visible para los anillos A y B. Las temperaturas observadas de los anillos principales se pueden reproducir sin la heterogeneidad vertical del albedo en luz visible.

Morishima et al. (2009), mencionan que las estimaciones de la fracción de rotadores rápidos y la inercia térmica son bastante indirectas y la estimación más sencilla es el uso de temperaturas observadas con varios ángulos de fase solar y lugares azimutales. Tales mediciones de temperaturas de los anillos ya se obtienen con CIRS de Cassini.

En 2010, A. Flandes y colaboradores presentan un conjunto de datos de temperaturas (antes del equinoccio) de los anillos principales de Saturno (A, B y C) obtenidos por el instrumento CIRS de la misión Cassini, estos datos resultan de una amplia variedad de geometrías y cubren hasta un rango de  $\sim 23^\circ$  del ángulo de elevación solar B' obtenidos con bajos ( $\alpha \sim 30^\circ$ ) y altos ( $\alpha \geq 120^\circ$ ) ángulos de fase, tanto para el lado sur (en este caso, iluminado) como para el lado norte (en este caso, no iluminado) de los anillos. Los autores introducen un modelo

semi-analítico térmico basado en la aproximación de monocapa presentada por Froidevaux, donde el único parámetro que se puede ajustar y estimar es el albedo de las partículas de los anillos.

El modelo considera que todas las partículas del anillo se comportan como cuerpos negros y que se calientan debido a la energía directa procedente del Sol (visible), así como la energía solar reflejada por la atmósfera de Saturno y de sus partículas vecinas (Flandes et al. 2010). Inicialmente, para analizar los anillos A, B y C se utiliza una función analítica similar a la función de sombra de Froidevoix aunque más simple desarrollada por Altobelli et al (2009):

$$C(B', \tau) = \frac{\sin B'}{1 - \exp(-\tau)} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\tau}{\sin B'}\right) \right]. \quad (4.8)$$

Esta función funciona bien, pero sólo funciona para geometrías restringidas, por ejemplo ángulos de fase cercanos a  $0^\circ$ , es decir, sólo para las regiones subsolares de los anillos y cuando el observador tiene al Sol casi detrás.

Para el anillo C, la función de sombreado numérica está basada en la técnica de ray tracing. Esta técnica usa imágenes que se generan mediante el trazado de la trayectoria de los rayos de luz para reproducir los efectos ópticos fundamentales con base en la óptica geométrica simple. Para las simulaciones se utiliza una capa de partículas esféricas lambertianas (partículas que reflejan la radiación incidente de manera uniforme en todas las direcciones) idénticas que se colocan en posiciones aleatorias. Se hace variar el ángulo de la fuente de luz como se observa en la siguiente figura:

En 4.4 se observa la variación de la temperatura en los anillos principales debido a la variación del ángulo de elevación solar  $B'$  y al ángulo de fase  $\alpha$ .

La gráfica superior representa el lado iluminado de los anillos (lado sur) y la gráfica inferior, la parte no iluminada (lado norte). Las líneas negras en los ejes x representan sus regiones de estudio. Los datos utilizados en este estudio fueron tomados desde la inserción en la órbita alrededor de Saturno de Cassini (julio de 2004) hasta el equinoccio de

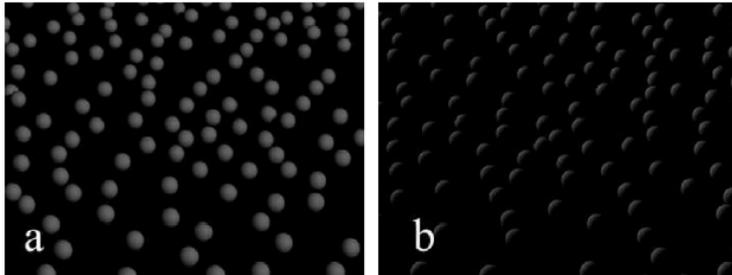


Figura 4.3: Diagrama de simulación ray tracing para el anillo C (Flandes et al. 2010).

Saturno (septiembre de 2009).

Algunas de las conclusiones dadas en el modelo es que las temperaturas de los anillos principales van disminuyendo conforme disminuye el ángulo de elevación solar  $B'$ . Debido a la profundidad óptica que presenta el anillo B, su temperatura es la más baja tanto en el lado iluminado y no iluminado.

Los datos utilizados tomados en tierra y por Voyager 2 son consistentes con los datos tomados por CIRS. La diferencia de temperatura entre los lados del anillo iluminado y no iluminado puede dar una idea de la estructura vertical de los anillos principales. Otra característica relevante es el hecho de que la temperatura en el lado no iluminado de los anillos disminuye con  $B'$ , esto sugiere que la energía solar que calienta al lado iluminado se transporta al lado no iluminado.

Los datos de CIRS confirman que la temperatura de los anillos principales varía con el ángulo de elevación solar  $B'$ , aunque aún sigue el debate de cual modelo (monocapa o multicapa) describe mejor la organización de las partículas de los anillos.

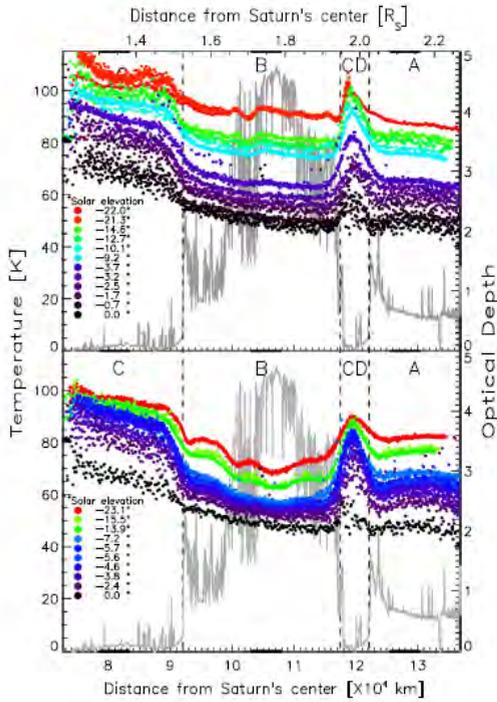


Figura 4.4: Escaneos radiales de los anillos principales con variación del ángulo de elevación solar B' (Flandes et al. 2010).

# Capítulo 5

## Modelos usados

### 5.1. Modelo 1 (T vs B')

El modelo que se utilizó para el análisis de la variación de la temperatura con el ángulo de elevación solar (sección 6.2) en esta tesis está descrito en Flandes et al. (2010). El trabajo presenta un análisis térmico basado en escaneos radiales de los anillos principales A, B y C, resultado de las exploraciones de CIRS de Cassini en diferentes ángulos de elevación solar B' (-24° a 0°) desde julio de 2004 hasta el equinoccio de Saturno en septiembre de 2009. Los datos de B' se obtuvieron con ángulos de fase bajos ( $\alpha \sim 30^\circ$ ) y altos ( $\alpha \geq 120^\circ$ ), tanto para la cara iluminada y no iluminada de los anillos. Con lo anterior, se confirma la variación de la temperatura de los anillos con el ángulo de elevación solar B'. Se resalta que este análisis amplía el análisis de ese trabajo considerando la División de Cassini y observaciones en diferentes ángulos de fase utilizando el mismo modelo físico. A continuación se resaltan algunos aspectos relevantes de este trabajo para este estudio.

Para fines de análisis, se optó por regiones, en cada anillo, donde la profundidad óptica tiene muy pequeñas variaciones y las observaciones seleccionadas obtenidas para tener control del tamaño de la huella fueron de  $r_s \leq 20R_s$ , donde  $R_s$  es el radio de Saturno, de tal manera que se observa un solo anillo. Las regiones particulares de cada anillo fueron con una medida  $\leq 5000\text{km}$  radial sobre sus caras iluminadas y

no iluminadas de los anillos.

Los siguientes conjuntos de datos fueron los utilizados para tener una mejor idea del comportamiento térmico de los anillos. La tabla 1 indica las diferentes geometrías de observación para los 12 escaneos radiales para el lado iluminado de los anillos (con datos del 14 de abril del 2005 al 12 de agosto del 2009), y la Tabla 2 indica las diferentes geometrías de observación para los 10 escaneos radiales para el lado no iluminado (con datos del 14 de diciembre del 2004 al 12 de agosto del 2009). La Figura 4.4 muestra los escaneos radiales que resultaron de las diferentes geometrías de observación mostrados en las tablas, para el lado iluminado se tienen rangos de  $B'$  entre  $-22^\circ$  y  $0^\circ$  y se observa una caída en la temperatura de  $\sim 40\text{K}$  en promedio. Cuando se presenta el equinoccio de Saturno, se observa que tanto para el lado iluminado y no iluminado, la temperatura es la misma y está cerca de  $10\text{K}$  que se correlaciona inversamente con la profundidad óptica.

Scan	Year	Day	$B'$ (deg)	$\alpha$ (deg)	B(deg)	$\Psi$ (h)
1	2005	104	-22.0	31.1	-7.6	16.0
2	2005	177	-21.3	0.3	-21.6	16.9
3	2006	349	-14.6	25.7	-22.4	7.0
4	2007	115	-12.7	15.2	-24.2	7.0
5	2007	298	-10.1	25.0	-2.6	4.7
6	2007	353	-9.2	35.0	-9.3	14.9
7	2008	347	-3.7	32.9	-9.1	15.4
8	2009	18	-3.2	42.3	-22.1	13.0
9	2009	60	-2.5	56.8	-34.0	13.3
10	2009	115	-1.7	51.4	-23.1	13.4
11	2009	175	-0.7	144.0	-34.4	20.0
12	2009	224	-0.0	70.9	-20.3	9.5

Tabla 5.1: Diferentes geometrías de observación utilizadas para el análisis térmico en el lado iluminado de los anillos de Saturno. (Flandes et al. 2010).

En la Figura 4.4 se observa la variación de la temperatura en los anillos principales debido a la variación del ángulo de elevación solar  $B'$  y al ángulo de fase  $\alpha$ . La parte superior representa el lado iluminado de

Scan	Year	Day	B'(deg)	$\alpha$ (deg)	B(deg)	$\Psi$ (h)
1	2004	349	-23.1	52.7	4.1	8.4
2	2006	285	-15.5	66.5	17.2	12.4
3	2007	35	-13.9	47.5	11.7	8.9
4	2008	125	-7.2	22.3	14.9	6.5
5	2008	221	-5.7	28.0	13.0	16.4
6	2008	127	-5.6	41.0	32.5	14.7
7	2008	288	-4.67	31.8	18.5	16.6
8	2008	342	-3.8	29.1	23.0	6.5
9	2009	64	-2.4	45.9	43.4	8.0
10	2009	224	-0.0	70.9	20.3	9.5

Tabla 5.2: Diferentes geometrías de observación utilizadas para el análisis térmico en el lado no iluminado de los anillos de Saturno. (Flandes et al. 2010).

los anillos (lado sur) y la gráfica inferior, la parte no iluminada (lado norte). Las líneas negras en los ejes x representan sus regiones de estudio. Los datos utilizados en este estudio fueron tomados antes de que ocurriera el equinoccio de Saturno (ver en las tablas).

Un resultado curioso que se observa es que también hay variación de temperatura para el lado no iluminado.

La temperatura graficada es una temperatura de brillo y no una temperatura estrictamente física. CIRS detecta un sólo espectro que es la superposición de temperaturas que emiten las partículas en la región de análisis o huella, todos los espectros analizados por CIRS se asemejan a las funciones de Placnk que está en términos de una temperatura representativa o de ajuste  $B(k, T)$ , donde  $k$  es el número de onda. La temperatura de ajuste es una representante de la temperatura dentro de la huella. También existe el parámetro  $b$ , que es un factor de escala que varía de 0 a 1 y representa la emisividad neta de la estructura de los anillos. Incluye su emisividad de las superficies de las partículas individuales, la sección transversal geométrica, y un componente que depende de la distribución de la temperatura dentro del campo de visión.

Como la explicación de cómo se organizan las partículas de los anillos aún no está resuelta, se utiliza un modelo analítico térmico basado en la aproximación de monocapa presentada por Froidevaux, donde el único parámetro que se puede ajustar y estimar es el albedo de las partículas de los anillos. En este trabajo se aproxima el valor del albedo para cada región de estudio, y si el ajuste es correcto en las gráficas resultantes entonces quiere decir que el modelo es adecuado para el análisis de la organización de las partículas. El modelo considera que todas las partículas del anillo se comportan como un cuerpo negro y se calientan debido a la energía directa procedente del Sol, así como la energía solar reflejada por la atmósfera de Saturno y de sus partículas vecinas (Flan-des et al. 2010). Para analizar los tres anillos principales (A, B y C) se utiliza una función de sombreado de análisis y para analizar solo el anillo C se utiliza una función de sombreado numérica. Ambos casos se basan en la aproximación por monocapa. La determinación de la función de sombreado,  $C$ , depende de la variación de la sombra de cada partícula y esta variación, a la vez, depende de  $B'$  y  $\tau$  (aunque también pueda depender de  $B$  y  $\alpha$ ).

Para el caso de los tres anillos principales, la función de sombreado analítico es muy parecida a la dada por Froidevaux para la variación del área fraccional no sombreada de las partículas con  $B'$ . Este modelo se basó en el modelo de monocapa, ya que el modelo de múltiples capas fue incapaz de reproducir las observaciones de las funciones de fase en los anillos en longitudes de onda visibles y particularmente la baja reflectividad de los anillos con ángulos de fase grandes.

### 5.2. Modelo 2 ( $T$ vs $\alpha$ )

El modelo de referencia que se utilizó para el análisis de la variación de la temperatura con el ángulo de fase (sección 6.1) está descrito en Altobelli et al. (2009). En este trabajo se presentan curvas de fase térmicas para los anillos principales de Saturno. Cabe aclarar que los datos de temperatura fueron los obtenidos durante cuatro años después de la inserción orbital de Cassini en Saturno, con una elevación solar

por encima de la parte sur de los anillos de  $10^\circ$  a  $23^\circ$ .

Se tomó como referencia el artículo de Altobelli et al. (2009) debido a que los datos obtenidos para este artículo proporcionaron por primera vez medidas de temperatura espacialmente resueltas sobre amplias gamas de ángulos de fase y para diferentes elevaciones solares. Para la descripción analítica, y que sólo tiene como objetivo describir la morfología de la curva de fase, fue utilizado el siguiente ajuste lineal exponencial con cuatro parámetros:

$$T(\alpha) = T_p \exp\left(-\frac{\alpha}{2w}\right) + S\alpha + T_b, \quad (5.1)$$

donde  $S$  representa la pendiente de la parte lineal de la curva, la amplitud de la curva está dada como:

$$A = \frac{T_p + T_b}{T_b}, \quad (5.2)$$

la mitad de la anchura a la mitad del máximo de la parte exponencial (por sus siglas en inglés) es:

$$HWHM = 2w \ln(2), \quad (5.3)$$

donde  $T_p$  y  $T_b$  son parámetros que tienen dimensiones de temperatura y están relacionados con la temperatura a fase de  $0^\circ$ ,  $T_0 = T_p + T_b$

En la Tabla 5.3 se muestran las diferentes regiones de estudio del artículo modelo con los diferentes parámetros utilizados para las curvas de fase. La Figura 5.1 son las gráficas resultantes del ajuste de las curvas de fase.

Ring Location	$R_s$	$B'$	$\tau$	$T_0(K)$	$A$	HWHM(deg)	$S(K \text{ deg}^{-1})$	$T_\pi$	$B_0$	$h$
Outer C ring	1.4-1.5	-16,-12	0.15	103	1.17	32.5	-0.05	-	-	-
Inner B ring	1.5-1.6	-15,-14	0.8	88.5	1.11	22.9	-0.02	75.3	0.96	0.22
Outer B ring	1.7-1.8	-15,-14	2.7	86	1.11	27.7	-0.03	72.0	1	0.24
Cassini Division	1.9-2.0	-16,-12	0.15	101.6	1.33	55.5	-0.03	-	-	-
Inner A ring	2.0-2.1	-15,-13	0.5	86.4	1.12	25.7	-0.01	74.1	0.87	0.25
Outer A ring	2.15-2.25	-15,-13	0.4	85.6	1.12	13.8	-0.0001	76.9	0.46	0.09

Tabla 5.3: Parámetros derivados del ajuste lineal-exponencial de las curvas de fase para las diferentes regiones. (Altobelli et al. 2009).

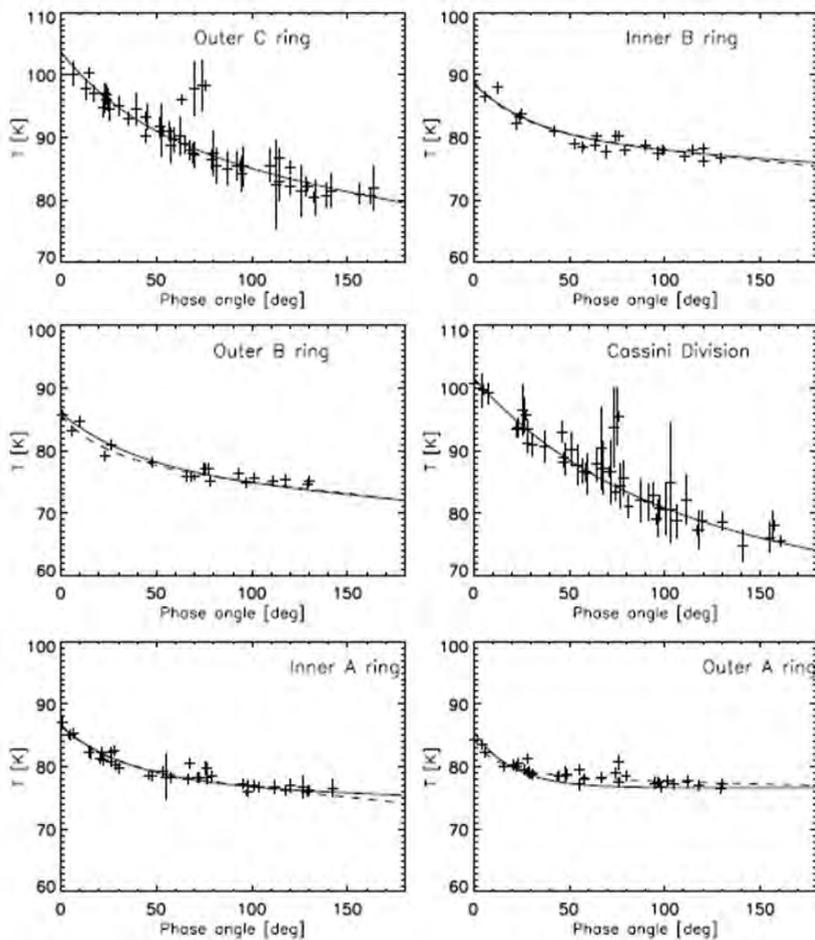


Figura 5.1: Curvas térmicas de fase para las diferentes regiones de estudio.

### 5.3. La base de datos

El conjunto de datos del instrumento CIRS agrupa los valores de temperatura máxima, mínima y promedio y especifica la geometría de observación para cada dato de temperatura, es decir, distancia radial, hora local, elevación y distancia de la nave, elevación solar y ángulo de

fase. La profundidad óptica de la región observada se deriva de los datos de ocultación obtenidos por el instrumento UVIS. Para este análisis, los conjuntos de datos obtenidos por los espectrómetros UVIS y CIRS de la misión Cassini fueron manipulados por medio del lenguaje de programación IDL (Interactive Data Language), que es un lenguaje de programación orientado al análisis de datos y que incluye una interfaz gráfica integrada lo que simplifica la visualización.

IDL consiste tanto en un entorno de programación interactiva y un lenguaje de programación. Se utiliza en una amplia gama de la ciencias y la disciplinas de ingeniería para el procesamiento y el análisis numérico y la imagen de datos.

Se escribió un programa con el que se seleccionaron los datos de regiones y geometrías específicas. El código busca los datos que cumplan con las geometrías buscadas, los grafica y les ajusta los modelos usados usando un ajuste no lineal. Los procesos se describen en el diagrama que se muestra en la Figura 5.2.

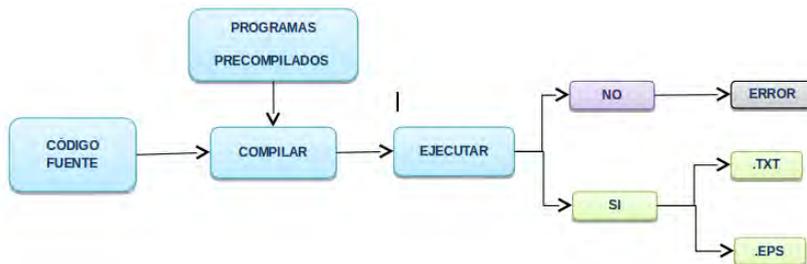


Figura 5.2: Diagrama de flujo del análisis de los datos en IDL, utilizado en la manipulación de los datos.

## 5.4. Regiones de estudio

Las diferentes regiones de los anillos principales que se analizarán tienen una característica común, son regiones relativamente homogéneas en profundidad óptica, es decir, en donde la profundidad óptica se mantiene casi constante. Es por esta razón que las regiones homogéneas se

## Modelos usados

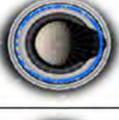
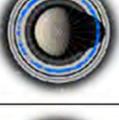
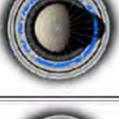
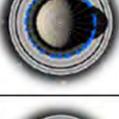
---

pueden estudiar de una mejor manera y de esta forma, conocer más a fondo su estructura y dinámica. Las diferentes regiones de estudio para los anillos principales de Saturno se encuentran en la siguiente tabla:

<b>REGIONES DE ESTUDIO DE LOS ANILLOS PRINCIPALES DE SATURNO</b>				
<i>Anillo Principal</i>	<i>Regiones</i>	<i>Km</i>	<i>Rs</i>	<i>Posición en Saturno.</i>
A	A2	128,000- 133,000	2.121- 2.204	
	A1	122,500-127,500	2.030- 2.113	

## Modelos usados

---

	<b>DC</b>	118,000- 122,000	1.955- 2.022	
<b>B</b>	<b>B4</b>	110,000- 115,000	1.823- 1.906	
	<b>B3</b>	105,000- 110,000	1.740- 1.823	
	<b>B2</b>	99,000- 104,000	1.640- 1.723	
	<b>B1</b>	93,000- 99,000	1.541- 1.640	
<b>C</b>	<b>C2</b>	84,000-89,000	1.392-1.475	
	<b>C1</b>	79,000- 84,000	1.309- 1.392	

# Capítulo 6

## Perfiles de temperatura

De la temperatura y de las variaciones de temperatura medidas a través de las observaciones espectroscópicas de la nave Cassini de los anillos principales de Saturno es posible inferir aspectos relevantes de su estructura, de su dinámica y de su composición.

### 6.1. Perfiles de temperatura 1: Curvas de fase

Antes de la misión Cassini, observaciones de teledetección de los anillos de Saturno sólo podían ser realizados por un número limitado de ángulos de fase (Esposito et al., 1984). Ahora, debido a la gran cantidad de datos térmicos disponibles (obtenidos por el espectrómetro infrarrojo CIRS), un requisito previo a cualquier trabajo de modelado sistemático es ser capaz de cuantificar la sensibilidad de las mediciones con respecto a los parámetros geométricos que caracterizan a la observación.

Las variaciones del ángulo de fase han mostrado tener una influencia crucial en las mediciones de la temperatura y las implicaciones para el modelado térmico de los anillos (Altobelli et al. 2009).

A continuación se presentan las mediciones de curvas de fase térmicas para diferentes valores de ángulos de fase para las diferentes regiones de estudio que fueron mostradas en el capítulo anterior.

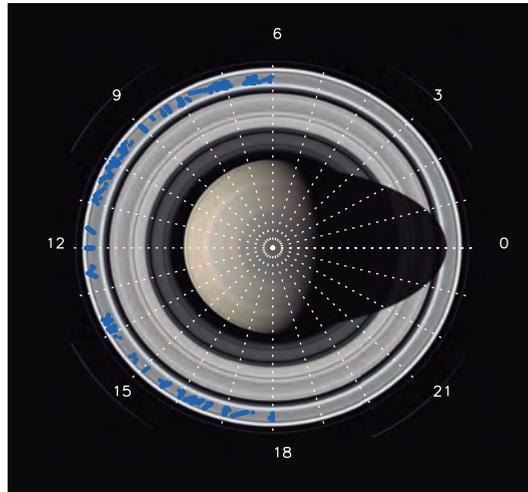
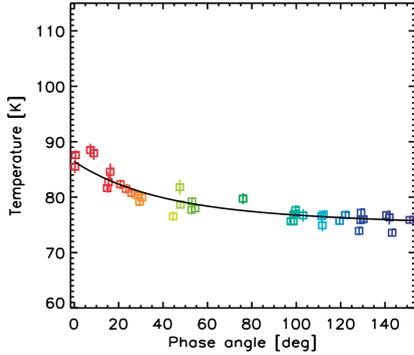


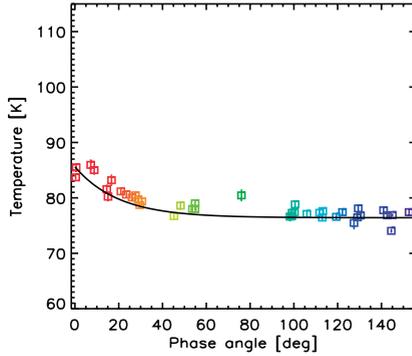
Figura 6.1: Imagen de Saturno con las variaciones de la hora local.

La Figura 6.1 es una imagen ilustrativa que no coincide con la sombra real que proyecta Saturno en los anillos, pero representa las variaciones de la hora (tiempo) local ( $\Psi$ ) en el polo sur de Saturno. Con un rango que va desde 0h (en el sentido contrario a la dirección solar) a 24h, lo que aumenta en sentido antihorario cuando se ve desde el polo norte de Saturno. La dirección solar indica el mediodía (12h). Los puntos azules representan el rango utilizado para la selección de datos  $06:00\text{hrs} < \Psi < 18:00\text{hrs}$ , para obtener la mayoría de datos en la región del mediodía.

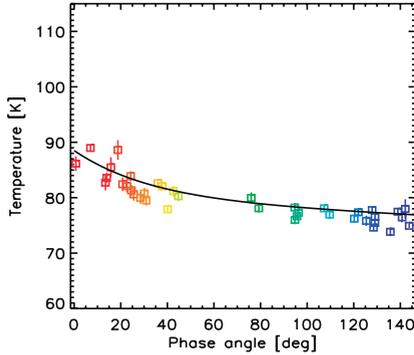
Ángulo de fase,  $\alpha$  [°]



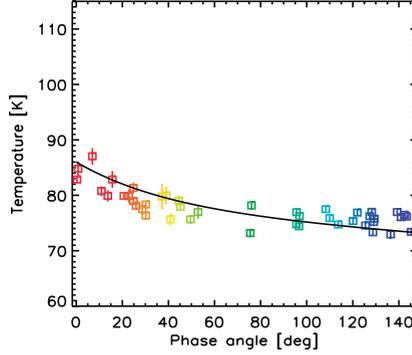
Curva de fase térmica para la región A1.



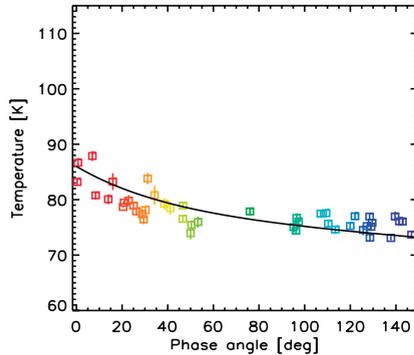
Curva de fase térmica para la región A2.



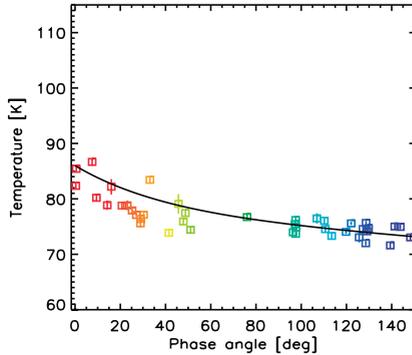
Curva de fase térmica para la región B1.



Curva de fase térmica para la región B2.



Curva de fase térmica para la región B3.



Curva de fase térmica para la región B4.

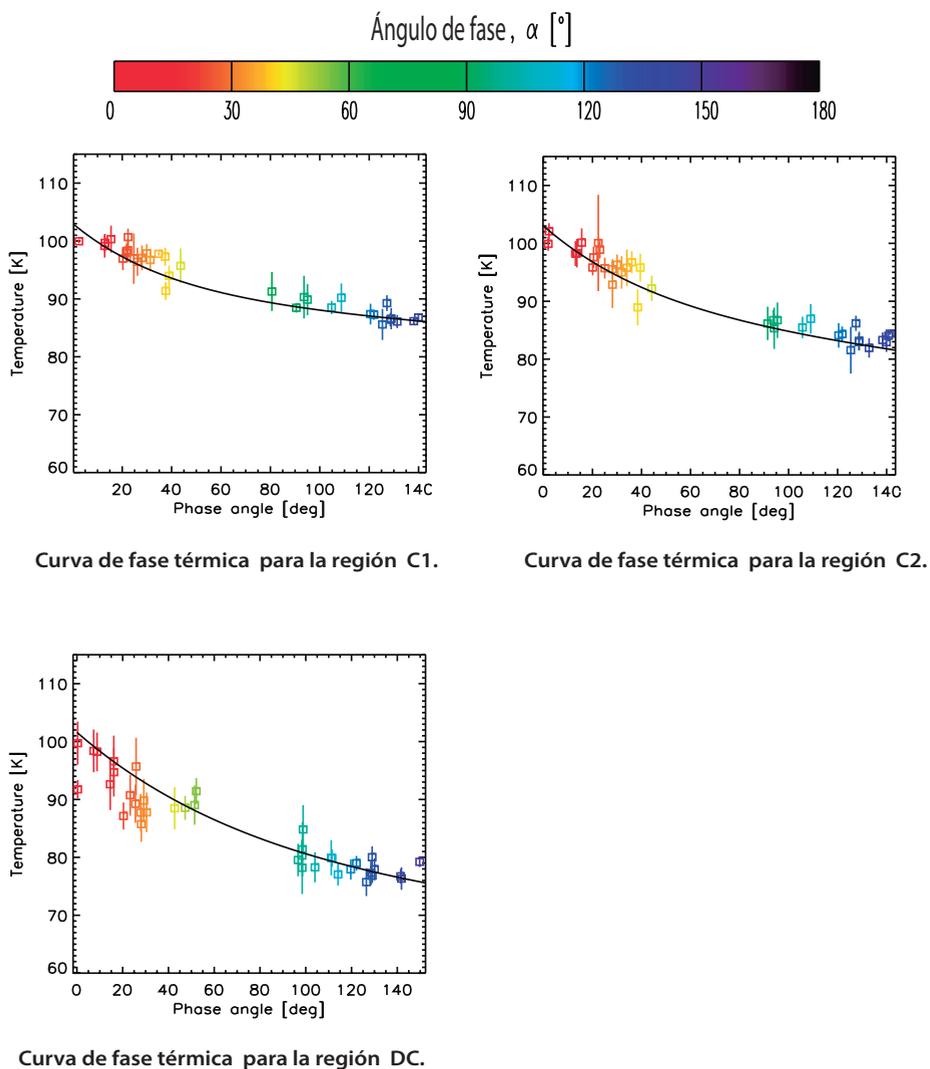


Figura 6.2: Curvas de fase térmicas para las diferentes regiones de estudio.

La Figura 6.2 muestra la variación de la temperatura con el ángulo de fase para todas las regiones de estudio. Los colores representan el ángulo de fase, en los extremos: el color rojo es para un ángulo de fase bajo y el azul para un ángulo de fase alto. Los datos fueron obtenidos por el canal del infrarrojo lejano del espectrómetro infrarrojo CIRS durante el año 2004 al año 2009 (el Sol brilla en el lado sur de los anillos) y cada punto de datos en las gráficas representa un promedio de temperaturas obtenidas con la variación del ángulo de fase, las barras de error representan la temperatura mínima y máxima del polígono de las 7 temperaturas que promedia Cassini. Se consideró sólo el canal del infrarrojo lejano ya que en este rango se encuentra el pico de la emisión de cuerpo negro de las partículas de los anillos, asegurando que la temperatura se ajuste a las incertidumbres más pequeñas.

Para todas las gráficas, se tomaron en cuenta las variaciones en las diferentes geometrías de observación. Para la hora local, se utilizaron los datos obtenidos durante las 6:00hrs y las 18:00hrs. con el fin de asegurar que las partículas tengan tiempo suficiente para alcanzar su equilibrio de la temperatura después de salir de la sombra (Ferrari et al., 2005; Leyrat et al., 2008a). Los valores del ángulo solar fueron de  $-16^\circ < B' < -12^\circ$  para reducir las variaciones estacionales de la iluminación solar. Para cada caso se tomó un rango de  $-55^\circ < B < 0^\circ$  para la elevación de la nave.

Para la obtención de las curvas de fase, se puede notar que todas las gráficas de las diferentes regiones tienen una forma similar: un aumento (exponencial) de la temperatura a bajos ángulos de fase y una disminución casi lineal de la temperatura a medios - altos ángulos de fase. Por esta razón se utilizaron los datos encontrados por Altobelli et al. (2009), donde la función:

$$T(\alpha) = T_p \exp\left(-\frac{\alpha}{2w}\right) + S\alpha + T_b, \quad (6.1)$$

es la más adecuada para la obtención de las curvas de fase.

Los parámetros para cada región de los anillos se resumen en la siguiente tabla.

## Perfiles de temperatura

Región	Rs	A	HWHM(deg)	T <sub>0</sub> (K)	T <sub>p</sub>	T <sub>b</sub>	S(K deg-1)	$\omega$
A1	2.030-2.113	1.12	25.7	86.4	9.26	77.14	-0.01	18.54
A2	2.121-2.204	1.12	13.8	85.6	9.17	76.43	-0.0001	9.95
B1	1.541-1.640	1.11	22.9	88.5	8.77	79.73	-0.02	16.52
B2	1.640-1.723	1.11	27.7	86	8.52	77.48	-0.03	19.98
B3	1.740-1.823	1.11	27.7	86	8.52	77.48	-0.03	19.98
B4	1.823-1.906	1.11	27.7	86	8.52	77.48	-0.03	19.98
C1	1.309-1.392	1.17	32.5	103	14.97	88.03	-0.05	23.44
C2	1.392-1.475	1.17	32.5	103	14.97	88.03	-0.05	23.44
DC	1.955-2.022	1.33	55.5	101.6	25.21	76.39	-0.03	40.03

Tabla 6.1: Parámetros utilizados para la obtención de las curvas de fase para cada región de los anillos principales.

Para las regiones pertenecientes a los anillos A y B se puede ver una curva de fase muy pronunciada, para ángulos de fase altos el comportamiento es más lineal y para ángulos bajos la curva da un notable régimen exponencial. Este aumento está directamente relacionado con el resultado de la superposición de las partículas y de las sombras que proyectan unas con otras (sombreado), la hora local también representa un factor importante para tener la forma de la curva de fase ya que los gradientes de temperatura vertical dentro de las regiones de los anillos no afectan a la forma de la curva, es decir, no hay variaciones con la elevación de la nave para ángulos azimutales fijos.

En las diferentes regiones de los anillos de Saturno el sombreado en las partículas estaría dado por el regolito en cada una de sus superficies, además de proyectar sombras unas con otras en el caso de las regiones ópticamente gruesas (anillos A y B). En las regiones de los anillos A y B las curvas de fase pueden estar estrechamente relacionadas con el comportamiento colectivo de las partículas.

Si las partículas son capaces de proyectar sombras unas sobre otras, las variaciones de la temperatura con el ángulo de fase resultan del promedio de la emisión de cuerpo negro de la parte iluminada (caliente) y la parte sombreada (fría), ponderado por su sección transversal de la superficie que depende del ángulo de fase dentro del campo de visión del instrumento (Altobelli et al. 2009) La baja inercia térmica de las

partículas provoca que las superficies iluminadas y sombreadas alcancen una temperatura de cuasi-equilibrio en escala de tiempo corto en comparación con escalas de tiempo dinámicos (Ferrari et al. 2005)

Para las regiones C1, C2 y DC, las curvas no son tan pronunciadas como en el caso de las regiones de los anillos A y B, debido a que no presentan una profundidad óptica alta, es decir, no hay comportamiento de sombra entre sus partículas. A su vez, las propiedades de regolito podrían inferirse de las curvas de fase térmica en las regiones de estos anillos ópticamente delgados, ya que se puede notar una variación importante en la temperatura. Es decir, el efecto o la variación térmica en estas regiones del anillo C y la División Cassini se puede deber al regolito de sus partículas.

En comparación con gráficas anteriores, la temperatura esperada en ángulo de fase igual a  $0^\circ$  es la misma, con  $T \sim 110\text{K}$ , que corresponde al valor de la temperatura más alta. Para ángulos de fase diferentes de  $0^\circ$ , es importante realizar un análisis de sombreado entre las partículas, llamada “función de sombreado”.

## 6.2. Perfiles de temperatura 2: Curvas de elevación solar

Las observaciones de los anillos de Saturno hechos desde la Tierra sugirieron que la variación de su temperatura se debía principalmente a la variación del ángulo de elevación solar. Las observaciones hechas por CIRS comprobaron esta variación.

En ésta sección se presentan gráficas del ángulo de elevación solar con datos del espectrómetro CIRS y sus respectivas curvas de elevación solar. Los datos utilizados corresponden a la cara iluminada de los anillos y fueron obtenidos del año 2004 al año 2009, antes del equinoccio de Saturno.

Las geometrías utilizadas fueron las siguientes: se utilizaron ángulos

de fase bajos ( $\alpha \leq 30^\circ$ ) para tener la mayor parte de las partículas iluminadas. Se tomó todo el rango del ángulo de elevación solar ( $-23^\circ < B' < 23^\circ$ ) pues es la geometría de interés. La selección de datos para el ángulo de hora local fue de  $06:00\text{hrs} < \Psi < 18:00\text{hrs}$ , para obtener la mayoría de datos en la región del mediodía. Para cada caso se tomó un rango de  $-20^\circ < B < 0^\circ$  para el ángulo de elevación de la nave.

Por otro lado, las curvas de elevación solar son el resultado del modelo analítico propuesto por Flandes et al. (2010), del cual fue tomada la siguiente ecuación para las temperaturas esperadas:

$$T = \sqrt[4]{(1 - A_v) [c_1 C (1 + c_2 A_v) + c_3] \frac{1}{r^2} + c_4}, \quad (6.2)$$

donde  $c_1 = S_\odot c_0^{-1}$ ,  $c_2 = \Omega_p/4\pi$ ,  $c_3 = A_s \Omega/2\pi L S_\odot c_0^{-1}$  y  $c_4 = \sigma T_s^4 \left(\frac{\Omega}{\pi}\right) c_0^{-1}$ .  $A_v$  representa el albedo de Bond y es el único parámetro libre en la ecuación, que cambia de acuerdo al anillo en estudio.

La ecuación (6.2) resulta de hacer un balance de energía de todas las fuentes de calor que actúan sobre las partículas de los anillos. Las principales fuentes de calor son la radiación solar  $F_{sol}$ , la radiación térmica de Saturno  $F_{th}$ , la energía solar reflejada por la atmósfera de Saturno  $F_{refs}$ , así como la energía reflejada  $F_{refp}$  y emitida por las partículas de los anillos  $F_{thp}$ , se representa de la siguiente manera:

$$F_{sol} = (1 - A_v) C (S_\odot/r^2), \quad (6.3)$$

$$F_{th} = \sigma T_s^4 \left(\frac{\Omega}{\pi}\right), \quad (6.4)$$

$$F_{refs} = A_s (1 - A_v) (S_\odot/r^2) (\Omega/2\pi) L, \quad (6.5)$$

$$F_{refp} = A_v (1 - A_v) C (S_\odot/r^2) \Omega_p/4\pi, \quad (6.6)$$

El balance de energía está dado como:

$$\sum_i F_i = f\varepsilon\sigma T_p^4 \left(1 - \frac{\Omega_p}{4\pi}\right), \quad (6.7)$$

De la ecuación (6.7) se obtiene que  $T_p^4 = \frac{\sum_i F_i}{c_0}$ , donde  $c_0$  está dado como  $c_0 = f\varepsilon\sigma \left(1 - \frac{\Omega_p}{4\pi}\right)$ .

Los valores de las constantes para encontrar  $c_0$  se encuentran en el apéndice de esta tesis, resaltando que  $f=2$  e indica que se están tomando a las partículas de los anillos como rotadores lentos, es decir, que giran lento e irradian, en promedio, de un solo hemisferio.

Agrupando los términos de la ecuación (6.7) se obtiene la ecuación (6.2). Esta última contiene al parámetro  $C$ , que es la función de sombreado aleatorio que produce la variación del área fraccional no sombreada de las partículas de los anillos con el ángulo de elevación solar  $B'$ , es decir, depende del ángulo de elevación solar y de la profundidad óptica de cada región:

$$C(B', \tau) = \frac{\text{sen}B'}{1 - \exp(-\tau)} \left[1 - \exp\left(\frac{-\tau}{\text{sen}B'}\right)\right]. \quad (6.8)$$

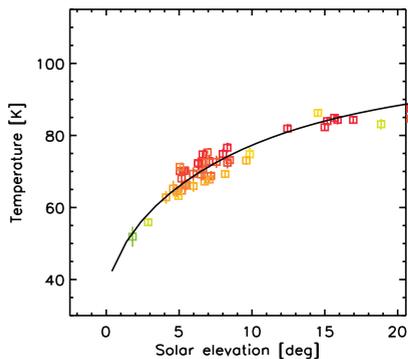
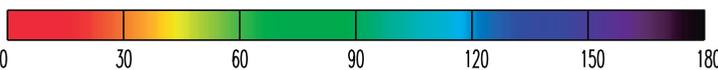
A continuación se muestra una tabla con los valores que se tomaron para la ecuación (6.2) en cada región de estudio.

Región	Rs	$\tau$	$\Omega_p$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$A_v$
C1	1.309-1.392	0.08	0.46	1.09E-07	1.25E+10	0.04	3.49E+05	3.29E+06	0.35
C2	1.392-1.475	0.15	0.84	1.06E-07	1.29E+10	0.07	3.60E+05	3.40E+06	0.38
B1	1.541-1.640	0.8	3.30	8.36E-08	1.64E+10	0.26	4.56E+05	4.30E+06	0.50
B2	1.640-1.723	1.5	4.66	7.13E-08	1.92E+10	0.37	5.34E+05	5.04E+06	0.51
B3	1.740-1.823	2	5.19	6.66E-08	2.06E+10	0.41	5.72E+05	5.40E+06	0.53
B4	1.823-1.906	2.7	5.60	6.29E-08	2.18E+10	0.45	6.06E+05	5.72E+06	0.54
A1	2.030-2.113	0.63	2.80	8.81E-08	1.56E+10	0.22	4.33E+05	4.08E+06	0.58
A2	2.121-2.204	0.4	1.98	9.55E-08	1.43E+10	0.16	3.99E+05	3.76E+06	0.59
DC	1.955-2.022	0.15	0.84	1.06E-07	1.29E+10	0.079	3.60E+05	3.40E+08	0.30

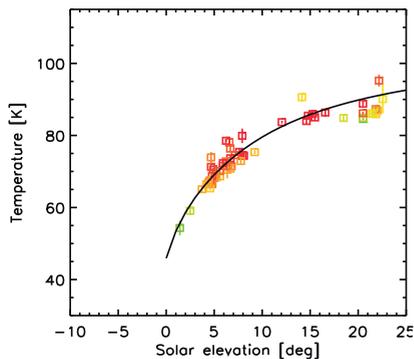
Tabla 6.2: Parámetros utilizados para la obtención de las curvas de elevación solar para cada región de los anillos principales.

Con los datos anteriores se obtuvieron las gráficas que muestran la relación entre el ángulo de elevación solar y la temperatura de las partículas de los anillos, con sus respectivas curvas de elevación solar. Las gráficas se muestran en la Figura [6.3](#).

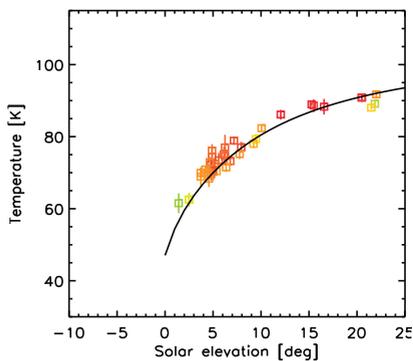
Ángulo de fase,  $\alpha$  [°]



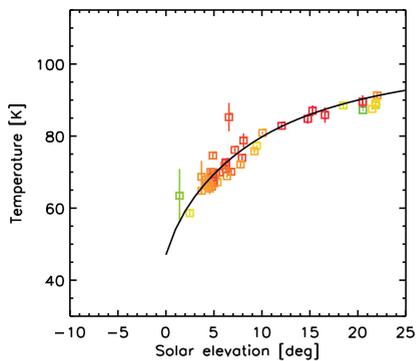
Curva de elevación solar para la región A1.



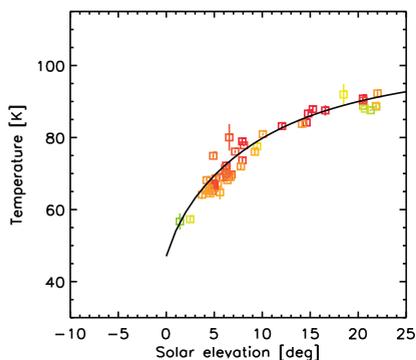
Curva de elevación solar para la región A2.



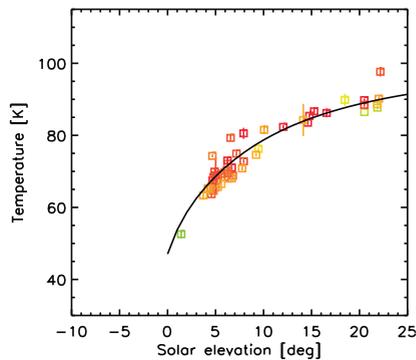
Curva de elevación solar para la región B1.



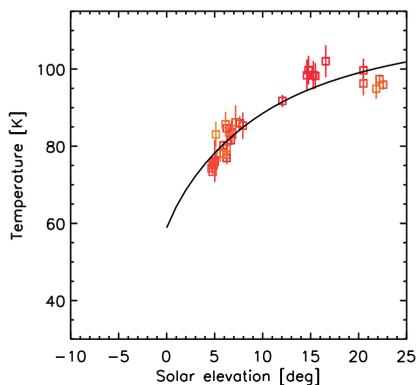
Curva de elevación solar para la región B2.



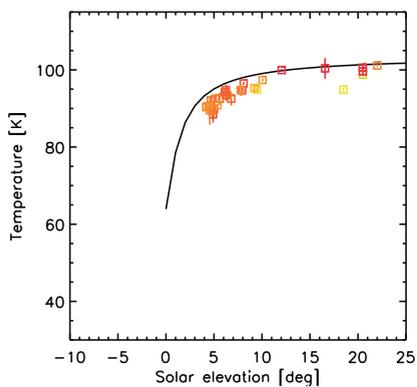
Curva de elevación solar para la región B3.



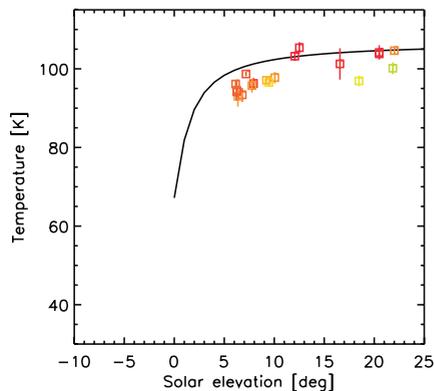
Curva de elevación solar para la región B4.



Curva de elevación solar para la región DC.



Curva de elevación solar para la región C1.



Curva de elevación solar para la región C2.

Figura 6.3: Curvas térmicas de elevación solar para las diferentes regiones de estudio.

En las gráficas anteriores, el único parámetro libre usado para las curvas de elevación solar fue el albedo de las partículas de los anillos, que sirve como parámetro de bondad del ajuste, pues los albedos se han medido directamente (Flandes et al. 2010).

Se puede observar que para cada región de los anillos, las curvas se adaptan a los datos estimados por CIRS, obteniendo así los valores aproximados del albedo de las partículas de los anillos.

En esta amplia gama de  $B'$  y para ángulos de fase bajos, los datos muestran que a medida que las regiones tienen una mayor profundidad óptica la temperatura es menor (las regiones del anillo C son más calientes que las otras regiones), y esto se observa claramente en las curvas de elevación solar. Por otro lado, las gráficas muestran que la temperatura de las diferentes regiones disminuye conforme disminuye el ángulo de elevación solar (donde el anillo B tiene la mayor disminución). En general, las temperaturas para los anillos A, B y C varían 29-38, 22-34 y 18-23 K, respectivamente.

Para el lado iluminado y en ángulos de fase bajos los valores del albedo para los anillos A, B y C fueron dados como 0.59, 0.50 y 0.35-0.38, respectivamente. Comparando con otros modelos, los resultados son semejantes en los valores del albedo. Froidevaux (1981) encontró 0.60, 0.55 y  $< 0.35$  para los anillos A, B y C, respectivamente, suponiendo rotadores lentos también, informando que para rotadores rápidos el valor del albedo es  $< 0.05$ . Por otro lado, Morishima et al. (2009) encontró 0.74, 0.55 a 0.74 y 0.00-0.52 para los anillos A, B y C, respectivamente, suponiendo un modelo multicapa para los anillos principales y una distribución bimodal de rotadores. Con lo anterior se puede decir que los anillos principales posiblemente son una mezcla de partículas que giran muy rápido (rotadores rápidos,  $f=4$ ) o partículas que irradian, en promedio, más de un solo hemisferio (rotadores lentos,  $f=2$ ). Finalmente, las partículas de los anillos están compuestas principalmente de hielo de agua, la proporción y el tipo de impurezas que contienen son desconocidos, por lo que los valores reales de los albedos son inciertos.

### 6.3. Variación de la temperatura con el ángulo de hora local ( $\Psi$ ) y con el ángulo de elevación de la nave ( $B$ )

Las diferentes geometrías de observación: ángulo de elevación solar, de fase, de la nave y la hora local, son variables no independientes, es decir, para analizar una geometría se tienen que tomar en cuenta las demás.

Existen muy pocos estudios acerca de la dependencia de la temperatura con el ángulo de la nave y la hora local. Se ha encontrado que las mayores variaciones de la temperatura en el lado iluminado de los anillos principales se deben principalmente a las variaciones en el ángulo de fase y de elevación solar, aunque el ángulo de elevación de la nave y la hora local son un efecto secundario para la diferencias en la temperatura. La temperatura aumenta cuando el ángulo de fase disminuye, la dependencia de la temperatura con el ángulo de fase parece estar ligado principalmente a la variación del ángulo de la hora local. La comprensión de sus dependencias es una clave para la comprensión de las propiedades térmicas y dinámicas de las partículas de los anillos de Saturno.

La variación en la hora local indica la transición de enfriamiento de las partículas cuando pasan a la sombra de Saturno, ya que el flujo de calor de entrada procedente del Sol y de Saturno cambia. El mediodía ( $\Psi=12\text{hrs}$ ) se le llama cuando el Sol está “frente” a las partículas y el flujo de calor es mayor en las partículas. De acuerdo con Leyrat et al., (2008), la disminución de la temperatura con el aumento del ángulo de fase en el lado iluminado durante la mayor parte de la hora local sugiere la presencia de partículas que giran lentamente, es decir, su inercia térmica está asociada con la velocidad de rotación. Se ha llegado a medir una variación de la temperatura en el anillo C de 20K cuando se llega al cruce de la sombra de Saturno. En general, las mediciones muestran que para ángulos de fase bajos, la temperatura aumenta en las partículas que se encuentran situadas entre las 6:00 y 18:00hrs. Este rango corresponde al lado opuesto de la sombra del planeta.

La hora local puede ayudar en la comprensión de la dinámica de las partículas de los anillos. Se ha detectado una variación azimutal del factor de llenado (representa la sección transversal de las partículas observada dentro de la huella, desde un lugar dado) en el anillo A con el cambio del tiempo local que da pauta a un efecto que puede ser creado por la presencia de inestabilidades gravitacionales como lo son los *wakes*. La orientación preferida de los *wakes* produce variaciones azimutales de brillo que se han observado en las zonas visibles. En el infrarrojo, el factor de llenado varía con el tiempo local dependiendo de la orientación de las aglomeraciones cuando se observan lateralmente o no. La modulación depende principalmente de la distancia media entre cada *wake* y en la extensión vertical de ellos (Colwell et al. 2006).

Por otro lado, el ángulo en el cual se toman los datos es un factor importante para el análisis de los mismos. Para los anillos A y B se tiene que la temperatura disminuye con la disminución del ángulo de elevación solar, mientras que los cambios de temperatura en el anillo C y la división Cassini son menos notorios. Solo para la región ópticamente más transparente del anillo C, las variaciones del factor de llenado se deben principalmente a los cambios en el ángulo de elevación de la nave (Altobelli et al., 2008). En general, la variación de la temperatura de las partículas de los anillos con el ángulo de elevación de la nave depende de la distancia radial a cada anillo. La dependencia de la temperatura con el ángulo del observador está directamente relacionada con la profundidad óptica de cada anillo, para regiones ópticamente opacas se detecta una temperatura menor.

## Capítulo 7

# Estructura de los anillos principales a partir de su profundidad óptica y sus perfiles de temperatura.

### 7.1. La estructura general de los anillos principales de Saturno

En 1859, el Físico escocés James Clerk Maxwell sugirió que los anillos de Saturno se componen de un número indefinido de partículas pequeñas, pero ni la nave espacial Cassini ha logrado visualizar una sola partícula en el anillo menos denso, es por esta razón que la estructura de los anillos principales de Saturno sigue siendo una fuente importante de estudio.

#### 7.1.1. Estructura de las regiones homogéneas de los anillos principales de Saturno con datos del instrumento UVIS de Cassini.

Los avances en el estudio de la estructura de los anillos se han dado gracias a la ayuda de dos métodos: uno indirecto y otro directo. El méto-

---

do indirecto se llama ocultación estelar y fueron científicos del Servicio Astronómico de la Unión Europea en Francia, los primeros en sugerir el uso de esta técnica en una misión de la ESA, este método se produce cuando la luz que llega a un observador de una estrella está bloqueada por un cuerpo intermedio (en este caso los anillos) y es en varios órdenes de magnitud mejor que la resolución de cualquier otro método basado en la Tierra. Para determinar la estructura de los anillos de Saturno, se utilizaron ocultaciones estelares para conocer la profundidad óptica ( $\tau$ ) en cada uno de éstos, descubriendo huecos en la División Cassini y en los anillos A y C, y algunas resonancias de Lindblad.

Por otro lado, el método directo son las imágenes obtenidas por los instrumentos de las naves espaciales que han proporcionado mayor información sobre la estructura, como ondulaciones, cuñas radiales, brechas, etc, en algunos de los anillos, revelando grupos individuales de partículas con tamaño de decenas de metros.

En este estudio, para facilitar el análisis de la estructura de los anillos principales, éstos se dividieron en regiones relativamente homogéneas, es decir, en regiones donde la profundidad óptica y la temperatura de brillo son casi constantes. Es por esta razón que las regiones homogéneas se pueden estudiar de una mejor manera y de esta forma, conocer más a fondo su estructura. Para conocer la estructura de las regiones homogéneas, se tomaron los datos de profundidad óptica normal obtenidos del instrumento UVIS (espectrógrafo de imágenes en ultravioleta) de la misión Cassini a través de varias ocultaciones estelares durante mayo de 2005 y agosto de 2008, los datos fueron proporcionados por Colwell et al., (2010).

A continuación se muestran las gráficas de la regiones homogéneas en cada uno de los anillos principales (del anillo interno al externo) con los datos obtenidos por UVIS.

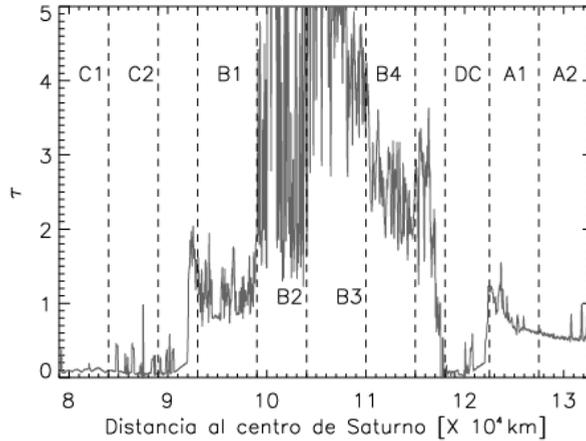


Figura 7.1: Gráfica de la profundidad óptica ( $\tau$ ) en todas las regiones homogéneas de los anillos principales, con datos obtenidos de ocultaciones estelares, tomados por UVIS a unos 10 km de resolución radial (TheAra041\_PDS\_10km\_051310).

La Figura 7.1 muestra los datos de profundidad óptica ( $\tau$ ) de todas las regiones de estudio (homogéneas) de los anillos principales de Saturno, obtenidos por el método de ocultación estelar y por el dato de archivo (TheAra041\_PDS\_10km\_051310) tomado por el instrumento UVIS de Cassini. Las regiones que no están indicadas son las regiones que no son de estudio debido a la inestabilidad que presentan y a su complejidad.

Morfológicamente hay similitudes entre la región A1 con la región B1 y la División Cassini con el anillo C. La profundidad óptica más alta es la del anillo B ( $\tau > 5$ ) con cambios considerados en las distintas regiones ( $\tau < 2$ ) del mismo. En general los anillos principales tienen profundidades ópticas típicas superiores a 0.1 y se componen fundamentalmente de partículas de más de 1 cm (Greenberg & Brahic, 1984). La nomenclatura de cada dato de archivo está definida en el Apéndice.

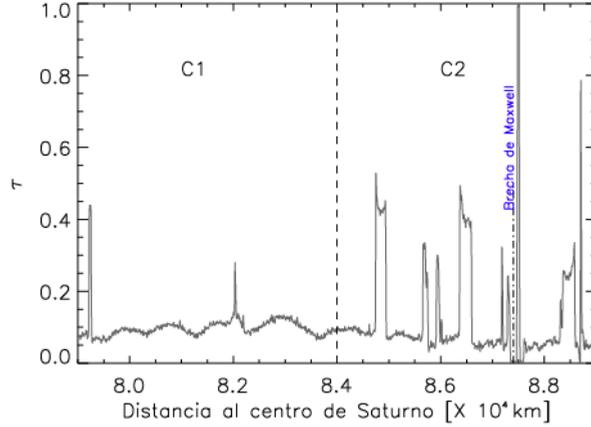


Figura 7.2: Gráfica de la profundidad óptica ( $\tau$ ) en las regiones C1 y C2, con datos obtenidos de ocultaciones estelares, tomados por UVIS a unos 10 km de resolución radial con el dato de archivo TheAra041\_PDS\_10km\_051310.

## Regiones del Anillo C

La Figura 7.2 muestra la profundidad óptica en las regiones homogéneas C1 y C2 del anillo C, donde C1 tiene una distancia radial a Saturno de 79,000 km a 84,000 km, se puede ver en la gráfica que su profundidad óptica es menor comparada con la región C2. Esto quiere decir que las partículas que componen la región C1 del anillo están más separadas respecto a la región C2 y, al haber más espacio entre las partículas se puede tener una región ópticamente transparente. Es una región más homogénea que C2.

Por otro lado, la región C2 es la región externa y heterogénea (debido a las mesetas o picos que presenta) del anillo C. Se puede observar que hay huecos muy estrechos debido a la profundidad óptica casi nula, cuyo origen aún es desconocido. A pesar de que la profundidad óptica es mayor que en la región C1, en general, la profundidad óptica es muy baja, por lo tanto, el anillo C es una región ópticamente transparente.

El anillo C tiene 17,500 kilómetros de ancho radial y una profundidad

---

óptica similar al anillo de División Cassini. El anillo C contiene la mayor parte de huecos o brechas radiales (resaltando en la Figura 7.2 la brecha de Maxwell o Maxwell gap), estructuras opacas estrechas, y regiones de 100 a 1000 km con una profundidad óptica ligeramente mayor (Colwell, 2009).

## Regiones del anillo B

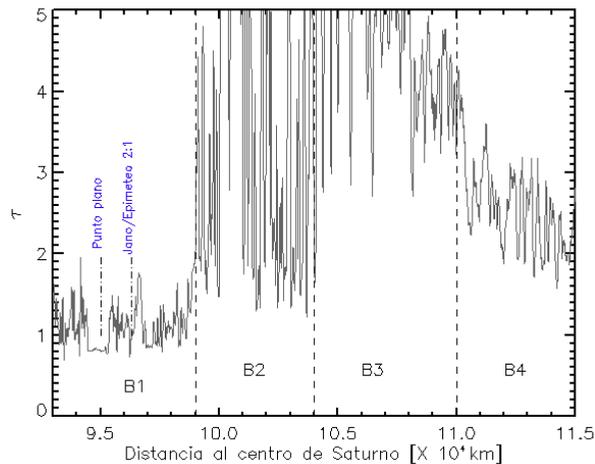


Figura 7.3: Gráfica de la profundidad óptica ( $\tau$ ) en las regiones B1, B2, B3 y B4 del anillo B. Datos obtenidos de ocultaciones estelares, tomados por UVIS a unos 10 km de resolución radial con el dato de archivo TheAra041\_PDS\_10km\_051310.

En la Figura 7.3 se observa que la región interna del anillo B (región B1) es menos densa en estructura respecto a las demás regiones, es decir, es relativamente transparente. También hay pequeños picos interrumpidos por un punto plano cerca de los 95,000km del centro de Saturno, este plano se debe a la homogeneidad entre las partículas, es decir, las partículas están distribuidas de modo que tengan una misma profundidad óptica. Aproximadamente a los 96,500km del centro de Saturno se observa un pico prominente resultado de la resonancia entre lunas cercanas, Jano y Epimeteo. Morfológicamente esta región es muy parecida

---

a la región A1 del anillo A debido a la redistribución de material en los bordes a través del transporte balístico de eyecciones de meteoroides (Durisen et al. 1992).

Las regiones B2 y B3 son las regiones más densas debido al cambio abrupto que hay en cuanto a profundidad óptica comparada con la región B1. En cuanto a estructura de las partículas, se puede hablar de una estructura vertical, ya que una partícula con otra se contraponen haciendo que la región sea casi opaca, y se dice “casi opaca” debido a que las regiones tienen ventanas muy estrechas donde la profundidad óptica se reduce casi a 2 en el caso de la región B2 y casi a 3 para la región B3. Las eyecciones de meteoroides pueden proporcionar una fuente para esta estructura (Durisen et al. 1989).

Para la región B4 también se habla de una estructura vertical, aunque haya una disminución de la profundidad óptica. Es una región asimétrica. En general, el anillo B es el anillo más denso de todos debido a su alta profundidad óptica.

### **Región: División Cassini**

En la Figura 7.4 la División Cassini se muestra como una región muy transparente, con una profundidad óptica muy similar al anillo C. Se pueden encontrar alrededor de ocho brechas estrechas ya que cuentan con profundidades ópticas casi nulas en esas distancias, una brecha conocida es la de Laplace y se encuentra a una distancia aproximada de 120,000km del centro de Saturno, con  $\sim 240$ km de anchura. La División de Cassini es la que separa a los anillos A y B, tiene cerca de 4,500 km de ancho con una profundidad óptica típica de 0.1, mucho más bajos que los anillos A y B. La División de Cassini contiene ocho huecos o brechas estrechas, posiblemente creadas y mantenidas por otros satélites pequeños (Marouf y Tyler 1986; Flynn y Cuzzi 1989).

Otro aspecto relevante en la estructura de la División Cassini son las resonancias de Lindblad, producidas por las lunas Atlas 5:4 y Pandora 9:7, que provocan que haya una mayor profundidad óptica en donde se

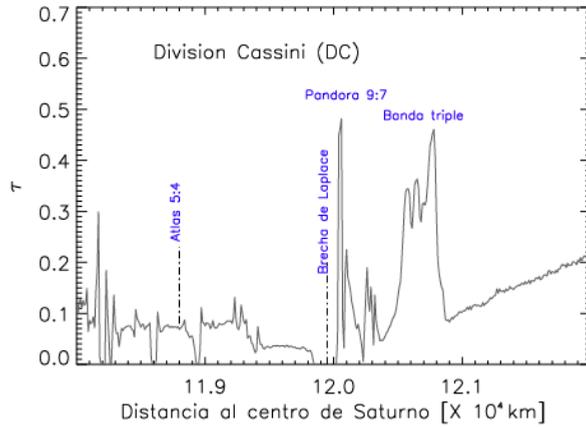


Figura 7.4: Gráfica de la profundidad óptica ( $\tau$ ) en la División Cassini. Datos obtenidos de ocultaciones estelares, tomados por UVIS a unos 10 km de resolución radial (AlpLeo009I\_PDS\_10km.050510).

localizan, debido a las ondas de densidad. La misión Cassini localizó una banda triple ubicada a 120,670 km del centro de Saturno, esta banda se debe a ondas de densidad causadas por la resonancia de Pan 7:6. Dentro de la División de Cassini también existen anillos muy delgados (en inglés: ringlets), en una ocultación estelar se muestran opacos, es decir, con una profundidad óptica prominente.

## Regiones del anillo A

La Figura 7.5 da la relación entre profundidad óptica y estructura en las dos regiones homogéneas del anillo A. A diferencia de las regiones del anillo B, las regiones de anillo A son menos densas y también presentan una estructura vertical, en la cual las partículas pueden chocar unas con otras formando agrupamiento de partículas por lapsos de tiempo cortos llamadas ondas de densidad. Se puede observar que la región más interna del anillo A (A1) presenta mayor densidad de partículas que la región A2, debido a que presenta una profundidad óptica mayor a causa de las ondas de densidad.

En la región externa del anillo A (A2) se pueden ver tres picos, éstos

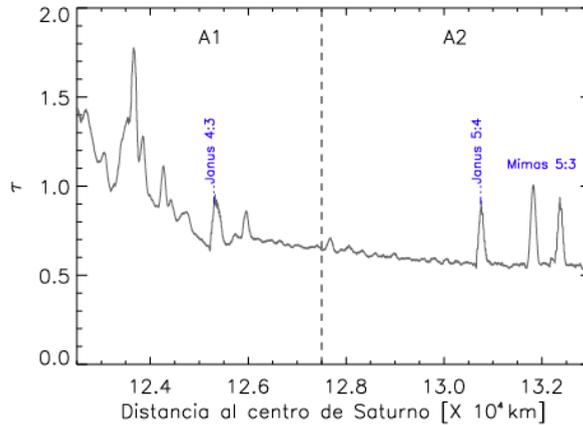


Figura 7.5: Gráfica de la profundidad óptica en las regiones A1 y A2 del anillo A.

son las resonancias de Lindblad con lunas cercanas, y es aquí donde se localizan las ondas de densidad de esta región. Las principales resonancias de Lindblad en el anillo A son: Janus 4:3, Janus 5:4 y Mimas 5:3 que se encuentran aproximadamente a 125,200km, 130,900 km y 132,000 km del centro de Saturno, respectivamente.

Los anillos principales de Saturno son un inmenso enjambre de partículas con tamaños del orden de metros, y muy probablemente haya colisiones entre ellas. Al haber estas colisiones y por la ley de la gravedad se pierde energía de traslación causando que la partícula emigre a una órbita más interna, es decir, más próxima a Saturno. Con esta condición se puede hablar de un cambio continuo en la distribución de partículas en los anillos, tal vez esta puede ser una aportación de que en la actualidad los anillos B y A sean ópticamente más opacos que el resto. Muy claramente la aportación principal de la distribución de los anillos principales son las fuerzas gravitacionales y magnéticas entre los cuerpos de su alrededor.

---

### 7.1.2. Estructura de las regiones homogéneas de los anillos principales de Saturno con datos del instrumento CIRS de Cassini

En el 2009, ocurrió el equinoccio más reciente de Saturno y cerca de éste la nave Cassini tuvo la oportunidad para hacer las mediciones relacionadas con la estructura vertical de los anillos principales como sombras proyectadas por ondas de flexión. La estructura vertical tiene medidas de kilómetros y se cree que es creada por pequeñas lunas en órbitas inclinadas. Las mediciones térmicas fueron hechas por el espectrómetro infrarrojo compuesto de Cassini (CIRS) cuyo objetivo fue informar sobre el transporte vertical de las partículas de los anillos a medida que orbitan a Saturno.

Con respecto a la estructura interna, Cassini ha mostrado que las partículas de los anillos forman agregados temporales de decenas de diámetros llamadas estelas autogravitantes, pero este tema, forma parte de la dinámica de los anillos.

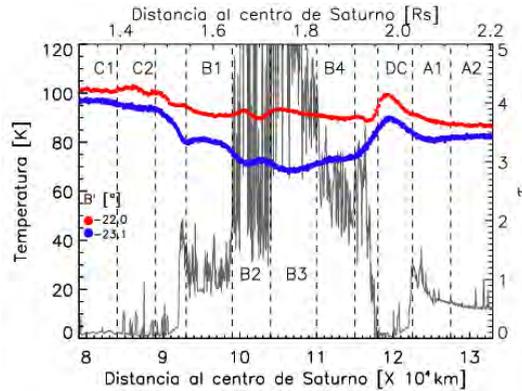
Cada región de los anillos contiene partículas en muchas orientaciones y temperaturas, y su emisión superpuesta produce un solo espectro (Flandes et al. 2010). Este espectro es detectado por CIRS y genera datos de temperatura aparente (brillo). Murphy, (1973) y Nolt et al., (1980) ya habían sugerido que las temperaturas observadas por las misiones anteriores a Cassini podrían variar con el ángulo de elevación solar ( $B'$ ). Este ángulo se encuentra entre el vector de los anillos de Saturno y el vector solar y se toma menor a  $0^\circ$  (negativo) antes del equinoccio de Saturno, es decir, cuando el lado sur de los anillos está iluminado. El ángulo de elevación solar ( $B'$ ) es mayor a  $0^\circ$  (positivo) después del equinoccio, cuando el lado norte de los anillos está iluminado.

Es un hecho que el Sol proporciona energía a las partículas que conforman a los anillos y éstas responden emitiendo radiación en el infrarrojo, pero esta radiación no es la misma en las diferentes regiones homogéneas de los anillos, ya que la profundidad óptica no es la misma, es decir, hay una relación directa entre la variación de temperatura de

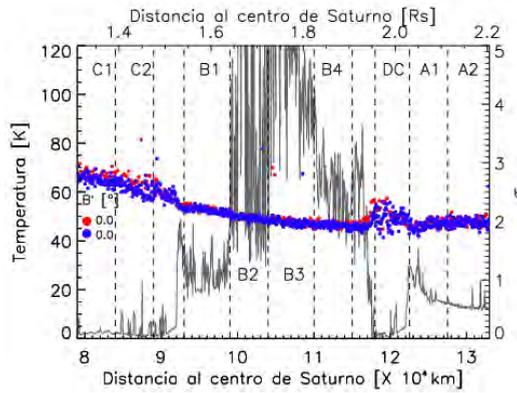
---

brillo detectada por CIRS y la profundidad óptica medida por UVIS.

Las siguientes gráficas dan a conocer la relación entre profundidad óptica ( $\tau$ ), medida por UVIS, con la variación radial de temperatura de los anillos medida por CIRS cuando hay variación en el ángulo de elevación solar ( $B'$ ). Estas variaciones de temperaturas fueron tomadas entre las fechas 14 de Abril del 2005 y 12 de Agosto de 2009, para el lado sur iluminado, y entre las fechas 14 de Diciembre del 2004 y 12 de Agosto del 2009, para el lado norte no iluminado. También se muestra la variación durante el equinoccio de Saturno.



(a)



(b)

Figura 7.6: (a) Gráfica de la profundidad óptica ( $\tau$ ) en todas las regiones de estudio (homogéneas) de los anillos principales (por UVIS a unos 10 km de resolución radial) y su relación con la variación de la temperatura y con el ángulo de elevación solar ( $B'$ ) máximo en el lado iluminado y no iluminado. 1  $R_s = 60,330\text{km}$ . (b) Gráfica de la profundidad óptica ( $\tau$ ) en todas las regiones de estudio (homogéneas) de los anillos principales y su relación con la variación de la temperatura y con el ángulo de elevación solar ( $B'$ ) durante el equinoccio.

La Figura 7.6(a) muestra una gráfica gris que representa la profundidad óptica ( $\tau$ ) en todas las regiones homogéneas de los anillos principales, con datos obtenidos de ocultaciones estelares, tomados por UVIS

---

a unos 10 km de resolución radial (TheAra041\_PDS\_10km\_051310). Las regiones que no están indicadas son las regiones que no son de estudio debido a la inestabilidad que presentan y a su complejidad. La gráfica de color rojo representa la variación radial de temperatura cuando hay una máxima iluminación de los anillos principales para el lado sur ( $B' = -22.0^\circ$ ). Por otro lado, la gráfica azul representa la variación radial de temperatura cuando  $B' = -23.1^\circ$  es decir, cuando  $B'$  tiene su máximo en el lado norte no iluminado. La diferencia es muy clara en la variación radial de la temperatura para el lado iluminado y no iluminado. Se observa cómo la temperatura decae  $\sim 40\text{K}$  en promedio en el anillo B en el lado no iluminado. Para los anillos A y C hay una similitud en la diferencia de temperatura entre el lado iluminado y no iluminado, a pesar de que el anillo A cuenta con más densidad de partículas que el anillo C. Esta similitud se debe a que las partículas del anillo C cuentan con más espacio para moverse hacia arriba, provocando que la temperatura de un lado como para el otro no sea tan distinta. De igual manera este efecto pasa en el anillo A.

Tanto en el lado iluminado como en el no iluminado de los anillos se puede notar la relación directa entre la profundidad óptica con la temperatura, donde las regiones que son “más frías” son las regiones ópticamente opacas debido al bloqueo entre partículas (regiones de los anillos B y A) y las regiones “más” cálidas son las regiones ópticamente transparentes (regiones del anillo C y DC), aquí las partículas no se traslapan y por lo tanto pueden recibir mejor la energía del sol ocasionando que tengan mayor temperatura que las partículas de los otros anillos. De nuevo se puede ver la similitud en temperaturas en los anillos C y DC.

Una de las dependencias de la temperatura aparente es si las partículas están girando rápidamente, si es así, las partículas que dan al sol se “calentarán” y la temperatura aumentará, también depende del lado iluminado o no iluminado. La gráfica del lado no iluminado de los anillos muestra temperaturas más frías.

En la Figura 7.6(b) se observa que durante el equinoccio de Saturno no hay una variación notable de temperatura para el lado iluminado y

---

no iluminado ya que los anillos están de canto al Sol.

## Regiones del anillo C

Haciendo un acercamiento a la Figura 7.6(a) para analizar cada una de las regiones de estudio, tenemos que para las regiones del anillo C existe una relación inversa entre la profundidad óptica y la temperatura que se muestra en la Figura 7.7. Se aprecia que en la región C1 la profundidad óptica es menor y más homogénea comparada con la región C2, esto quiere decir que las partículas en C1 están más separadas entre sí y la energía solar puede incidir directamente sobre toda su superficie, haciendo que su temperatura sea mayor. Como es una región más homogénea, la temperatura se mantiene casi constante  $\sim 110\text{K}$ , esto para el lado iluminado.

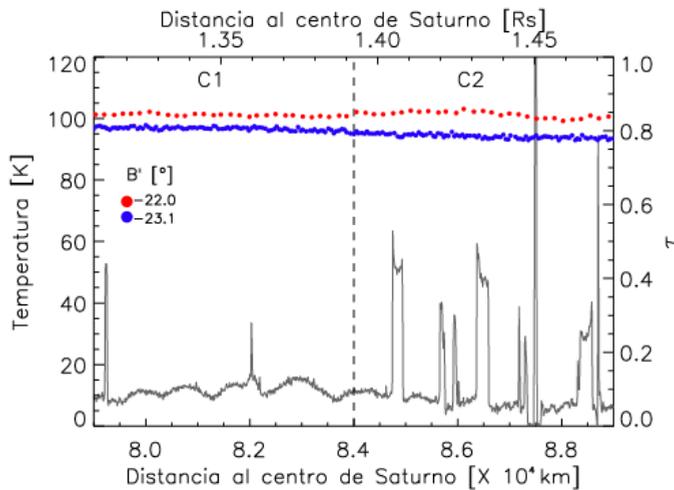


Figura 7.7: Escaneo radial de las regiones C1 y C2 del anillo C, con variación en la temperatura para el lado iluminado y no iluminado.

En la región C2 se encuentran los picos que representan grupos de partículas, cuando las partículas están juntas unas con otras generan sombras, provocando que la radiación del Sol no incida sobre la superficie de cada de ellas, y que la temperatura promedio sea menor que en

---

la región C1. El ejemplo claro está a la distancia radial de  $1.45R_s$  donde se observa una ligera caída de la temperatura en el lado iluminado.

El anillo C tiene una profundidad óptica máxima muy pequeña ( $\tau = 1$ ), por lo que la temperatura promedio será mayor que en los anillos densos (B y A). A pesar de la disminución de la temperatura ( $\sim 18\text{-}23\text{K}$ ) para el lado no iluminado, ésta se mantiene casi constante para las dos regiones, lo que indica que el anillo C es ópticamente transparente y con una distribución de partículas casi constante. Aunque la temperatura en el anillo C permanece casi constante a cierto ángulo  $B'$  se puede hablar de una estructura vertical en las partículas y no necesariamente una monocapa.

### Regiones del anillo B

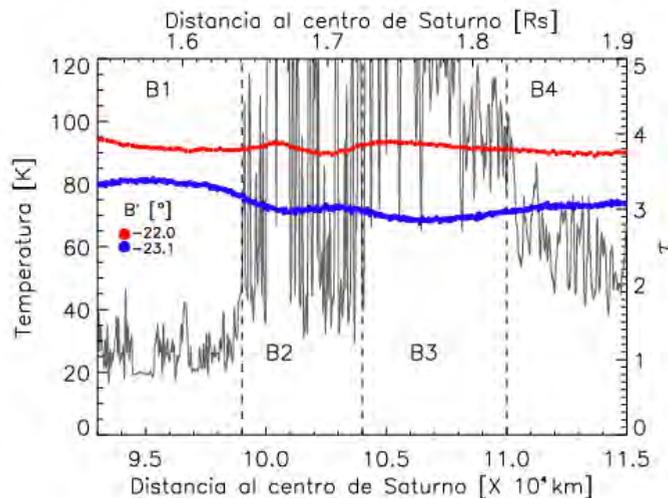


Figura 7.8: Escaneo radial de las regiones homogéneas del anillo B, con variación en la temperatura para el lado iluminado y no iluminado.

En la Figura 7.8 se muestra una disminución de la temperatura comparada con la Figura 7.6(b), esto se debe a que hay mayor aglomeración de partículas en el anillo B respecto a los demás anillos, provocando

---

que las partículas entre sí generen “sombra”. Es notable que al haber una profundidad óptica mayor la temperatura disminuye, como en la región B2 donde la temperatura decae hasta aproximadamente 10K cuando  $B' = -22^\circ$ . Al contrario del anillo C, en el anillo B hay demasiadas partículas y esto ocasiona que una con otra se traslapen y que la energía del Sol no incida en toda la superficie de una partícula, es decir, una con otra generan sombra y el resultado es una temperatura promedio baja. Otro aspecto importante es que las partículas no se mueven o giran de manera libre ocasionando que su temperatura disminuya en cada partícula.

Las regiones B1 y B4 son “asimétricas” donde la temperatura es mayor para la región B1 y menor para la región B4 debido a la baja y a la alta profundidad óptica, respectivamente. Se habla de una multicapa para las diferentes regiones del anillo B ya que la profundidad óptica es alta y la temperatura promedio es baja para todas las regiones, en general, hay una estructura vertical para todo el anillo.

En el lado no iluminado (gráfica azul), hay una caída en la temperatura de  $\sim 40\text{K}$  para las regiones B2 y B3, y son en éstas regiones donde la temperatura varía debido a que la profundidad óptica también es variable.

---

## Región de la División Cassini (DC)

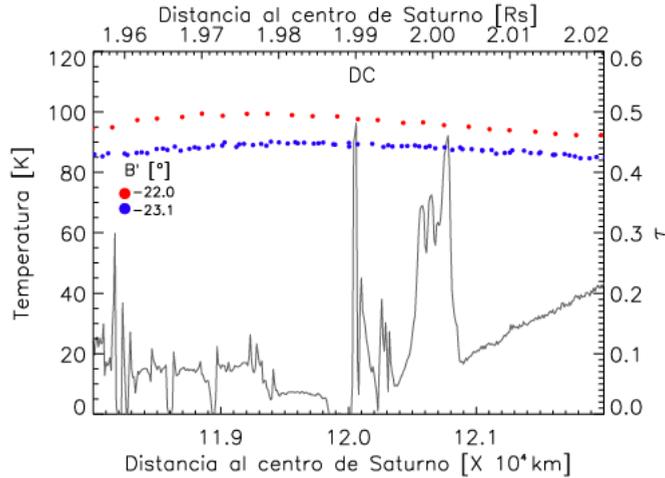


Figura 7.9: Escaneo radial de la región de la División Cassini, con variación en la temperatura para el lado iluminado y no iluminado.

Es claro que en la División Cassini (DC) (mostrada en la Figura 7.9), la variación de la temperatura es muy parecida a la variación de la temperatura en el anillo C tanto para el lado iluminado y no iluminado. Por otro lado, para los diferentes  $B'$ , la temperatura disminuye en las resonancias Pandora 9:7 y en la banda triple lo que da la relación entre la profundidad óptica, las ondas de densidad y la variación en la temperatura.

Un aspecto interesante es que en los huecos de la División Cassini no debería haber alguna variación en la temperatura, sin embargo, la hay. Este aspecto puede deberse a que los huecos no están totalmente vacíos, puede haber partículas pequeñas y muy dispersas que emiten parte de la energía del Sol que les llega a toda su superficie.

En general, se sabe que la División Cassini es una región con muy pocas partículas y al estar dispersas, la energía incidente del Sol en todas sus superficies provoca que se pueda medir una temperatura promedio mayor a la temperatura medida en los anillos densos A y B.

---

## Regiones del anillo A

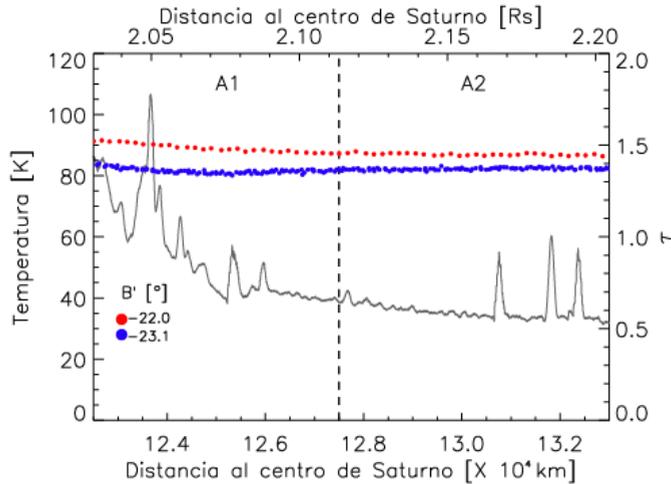


Figura 7.10: Escaneo radial de las regiones homogéneas del anillo A, con variación en la temperatura para el lado iluminado y no iluminado.

A pesar de que la profundidad óptica en el anillo A es menor que en el anillo B, la Figura 7.10 muestra que la variación en la temperatura a diferentes  $B'$  en los lados iluminado y no iluminado es menor en el anillo A. En la región A1 la temperatura es relativamente más variable que en la región A2, y como se ha mencionado en las gráficas anteriores, se debe a que las resonancias crean ondas de densidad y esto da una medida más alta en profundidad óptica y baja en temperatura. Las partículas al estar muy cerca una de otra van generándose sombra y la energía del Sol no incide en las superficies de todas las partículas, dando una temperatura relativamente fría. Al haber un traslape en las partículas de las regiones A1 y A2 se puede hablar de una estructura vertical, en la cual las partículas pueden chocar unas con otras formando las ondas de densidad.

Cuando se presenta el equinoccio, la temperatura en las regiones de A es menor comparada con las temperaturas de las regiones de los ani-

---

llos tenues C y DC, a pesar de contar con una estructura vertical más marcada.

Las regiones homogéneas en cada anillo poco a poco van cambiando en estructura, y no es difícil imaginar que la temperatura cambie con el paso del tiempo.

La variación del ángulo de elevación solar da como resultado una variación en la temperatura, sin embargo, existen otros ángulos de diferentes geometrías que también proporcionan información sobre la temperatura y estructura de los anillos.

# Capítulo 8

## Conclusiones

Los anillos de Saturno representan el sistema más complejo y completo de anillos de todo el Sistema Solar, por lo tanto su estudio es muy importante en la definición de procesos que se pueden extrapolar a otros sistemas de anillos. Dentro del sistema de anillos de Saturno, los anillos principales A, B, C y la División Cassini son los más estudiados, ya que se componen en su mayoría de rocas (partículas) individuales que presentan cierta estructura, dinámica y composición dependiendo en qué región de los anillos se encuentren.

### 8.1. Dinámica

La misión Cassini ha aportado mayor información en el estudio de la dinámica en los anillos principales de Saturno. La cuestión de la dinámica de los anillos es identificar y comprender los procesos físicos subyacentes y conectarlos con las observaciones en términos de modelos matemáticos y simulaciones de computadora (Dougherty et al., 2009). Para los anillos principales opacos (densos) de Saturno A y B, los procesos físicos importantes son las colisiones disipativas entre las partículas del anillo, su movimiento en el campo de gravedad de Saturno, su mutua gravedad y la interacción gravitacional con las lunas de Saturno, externas o incrustadas en los anillos. La importancia de la autogravedad de

los anillos se hizo evidente a partir de la identificación de estelas gravitacionales (de ahora en adelante, wakes) en los datos de Cassini de casi todas las regiones de los anillos A y B. Las wakes implican que los anillos están en un plano, dinámicamente frío, donde las partículas de los anillos colisionan de manera dispersa, formando cúmulos en el plano del anillo, que se rompen nuevamente por cizallamiento en escalas de tiempo orbitales, Figura 8.1.

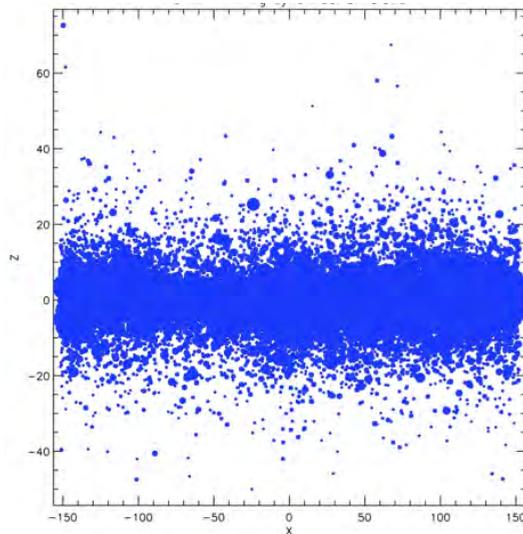


Figura 8.1: Modelación de *wakes*. Las partículas se encuentran en un plano siguiendo una ley de potencias, formando una región ópticamente opaca. (Cortesía: Flandes, A.)

Por otro lado y en la discusión relacionada con la estructura de los anillos, una característica relevante es la diferencia de temperaturas entre el lado iluminado y no iluminado de los anillos que puede dar una idea de la estructura vertical de los anillos principales. La característica relevante es el hecho de que la temperatura del lado no iluminado disminuye con  $B'$ , así, se sugiere que la energía solar que calienta el lado iluminado se transporta al lado no iluminado. También, se mencionó que la profundidad óptica es un factor que influye en la estructura, y ésta, a su vez influye en la dinámica de los anillos. Así, la transparencia

de cada anillo depende de la separación de las rocas que lo componen, como el anillo C y la división Cassini que son muy transparentes y se puede ver a través de ellos. Las resonancias causadas por la interacción entre las lunas y los anillos crean numerosas ondas de densidades y ondas de flexión dando la dinámica de las partículas de los anillos.

En comparación con los anillos transparentes (C y DC), las partículas de los anillos opacos (A y B) son más dinámicas. El anillo B es el más opaco y está compuesto de rocas que se tocan y se traslapan, formando capas. Es por esta razón que en las gráficas del capítulo 6.2 las temperaturas de las regiones del anillo B son menores que en otras regiones. La opacidad en el anillo B depende de la estructura y la densidad de las partículas. En este anillo existe la influencia de *wakes* provocando una mayor densidad en las distintas regiones, por lo tanto, se detecta una disminución en la temperatura.

Por su lado, el anillo A es el caso especial en el sistema de anillos principales de Saturno, ya que es el anillo con mayor dinámica debido a que es el más cercano al límite de Roche. En la Figura 7.5 se pueden observar caídas en el valor de la profundidad óptica, esto quiere decir, que la estructura que forman las partículas es muy diferente en ciertas regiones del anillo. Las *wakes* son las principales estructuras que se pueden observar con las imágenes de Cassini, como se puede ver en la Figura 8.2, se observan como sombras o bandas inclinadas, u ondulaciones que indican que las rocas del anillo están sometidas a fuerzas que las hacen desplazarse en direcciones distintas a sus trayectorias orbitales naturales.

En el artículo de Colwell et al., (2006) se hace un análisis detallado de las mediciones a través de ocultaciones estelares hechas por Cassini de las *wakes* en el anillo A y uno de los resultados se observa en la Figura 8.3. En su análisis, ellos encontraron que la altura/anchura de las estructuras aplanadas fue de 0.15 a 0.37, aumentando hacia afuera a través del anillo. La separación entre las *wakes* aumenta con su altura desde un valor bajo en el interior del anillo menor que la anchura del *wake* hasta mayor a 3 veces la anchura del *wake* a un tercio del anillo exterior. La opacidad de los huecos entre las *wakes* también aumenta en

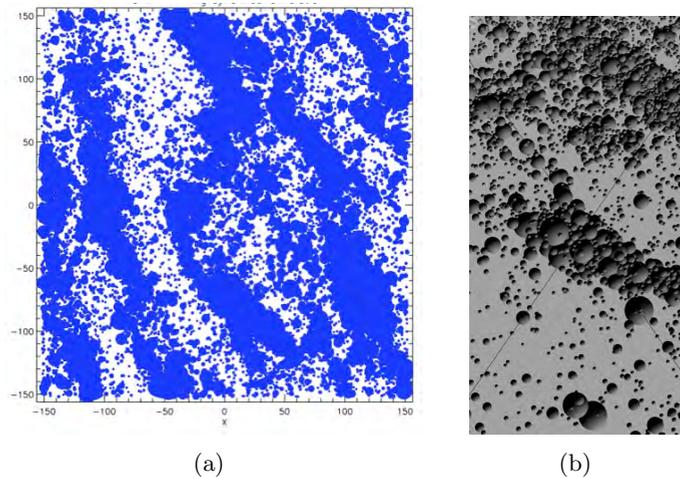


Figura 8.2: Simulación de *wakes* en el anillo A de Saturno, donde se observa una profundidad óptica muy variante dentro del anillo.

la parte externa del anillo. En este artículo se calcula que la opacidad vertical del anillo A es un 15-35 % mayor que la que se había reportado anteriormente. La asimetría en la opacidad de las regiones del anillo es causada principalmente por las aglomeraciones que continuamente son destruidas.

En la Figura 8.3 se observan tres perfiles de profundidad óptica medidos por el instrumento UVIS de Cassini en el anillo A de Saturno que muestran variaciones en la opacidad debido a la geometría de visualización con respecto a las *wakes* alineadas en el anillo. Estos tres perfiles fueron el resultado del método de ocultación estelar.

No obstante, la gravedad no explica por si sola muchas de las estructuras y la dinámica que se observa en los anillos principales y hay que tener en cuenta otros fenómenos como fuerzas electrostáticas y la viscosidad entre las partículas de los anillos. Las resonancias causadas por la interacción entre las lunas o cuerpos de menor masa y las partículas de los anillos crean numerosas ondas de densidad y ondas de flexión dando la dinámica de las partículas de los anillos. Las ondas de densidad son acumulaciones de partículas a ciertas distancias del planeta. Esta

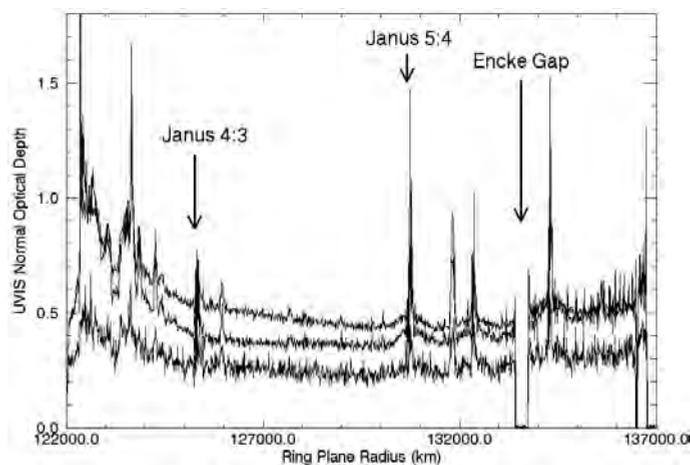


Figura 8.3: Identificación de *wakes* en el anillo A (Colwell et al., 2006).

característica está llena de perturbaciones agrupadas, que los investigadores informalmente se refieren como *straw* debido a su morfología. La Figura 8.4 es una imagen reciente de alta resolución tomada por Cassini en donde se muestra una onda de densidad junto con una *straw* en el exterior del anillo A.

En la interacción lunas-anillos también existen otras perturbaciones denominadas *propellers* debido a la forma que tienen. Este agrupamiento temporal de partículas dentro de los anillos se crea debido a la perturbación de una luna o alguna partícula de mayor tamaño con las demás partículas de los anillos. Los *propellers* se forman alrededor de pequeñas lunas invisibles, mientras que las *straws* son agrupaciones de partículas sin un núcleo más denso.

A unos meses de dar por finalizada la misión, las imágenes que recientemente ha mandado Cassini tienen una mayor resolución debido a la cercanía que tiene la nave con los anillos principales. En su fase de órbita “anillo-pastoreo”, la nave ha mandado imágenes más espectaculares donde se pueden observar características como las *wakes*, *straw* y *propellers*. Las Figuras 8.4 y 8.5 son ejemplos de algunas de las imágenes recientes de los anillos A y B de Saturno. La Figura 8.5 muestra el borde

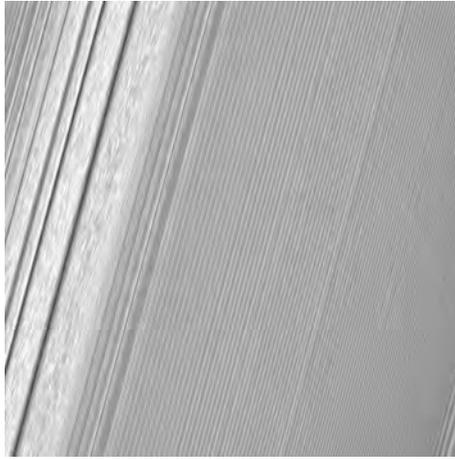


Figura 8.4: Onda de densidad y *straw* en el anillo A (a la izquierda) que se encuentra a 134,500 km de Saturno. Imagen tomada por Cassini el 18 de diciembre de 2016. (Imagen: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute)

externo del anillo B, a la izquierda se puede observar la perturbación en forma de *straw* generada por la resonancia 2:1 con la luna Mimas.

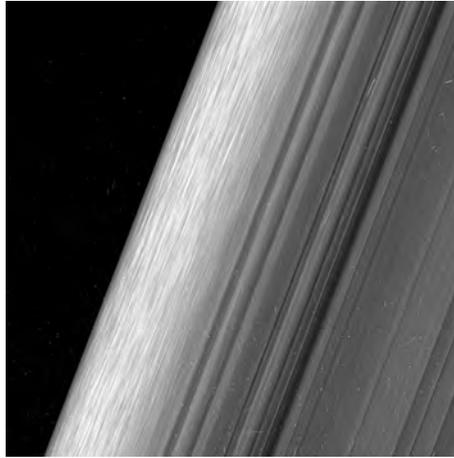


Figura 8.5: Región más externa del anillo B (región B4) en donde se muestra a la izquierda una *straw* causada por la resonancia gravitacional más poderosa en los anillos: resonancia 2:1 con Mimas. (Imagen: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute)

Por último y como se vio en el capítulo 6.2, la comparación entre los estudios teóricos y las observaciones de Cassini de la emisión térmica de los anillos proporciona restricciones sobre las velocidades de giro de las partículas del anillo, que de otro modo no son directamente observables. La distribución de tamaño de las partículas y pequeñas lunetas incrustadas en los anillos, junto con las formas observadas y las densidades internas de pequeñas lunas justo al exterior de los anillos, dan importancia de la acumulación y fragmentación para la evolución dinámica del sistema de anillos de Saturno.

## 8.2. Composición

La composición de las partículas que forman a los anillos principales de Saturno es otro tema de interés en las investigaciones realizadas con Cassini. Aunque el espectrómetro CIRS no es el instrumento más apto para analizar la composición de las partículas, indirectamente da cierta información sobre ésta, con las observaciones hechas en el rango del infrarrojo se puede intuir que es el hielo (de agua) el compuesto

principal de las partículas. Los espectros de los anillos a través de las regiones espectrales del infrarrojo cercano, visible y UV, y los cambios inducidos por el ángulo de fase y el ángulo de elevación solar en cada región de los anillos permiten dar conclusiones cualitativas acerca de qué materiales se encuentran y no se encuentran en los anillos. Como se vio en los Capítulos 6.2 y 7.1, a medida que el ángulo de elevación solar disminuye a  $0^\circ$  (equinoccio), la temperatura disminuye debido a que las partículas de los anillos se hacen más frías. Por otro lado, los valores del albedo utilizados en cada anillo principal son aproximados, ya que las partículas de los anillos están compuestas principalmente de hielo de agua, pero la proporción y el tipo de impurezas que contienen son desconocidos, por lo que los valores del albedo real son inciertos. La fusión de conjuntos de datos de múltiples longitudes de onda permite probar diferentes modelos térmicos, combinando los efectos del albedo de las partículas, la composición del regolito, el tamaño del grano y las propiedades térmicas con las estructuras anulares.

Ahora, de acuerdo a un estudio hecho por Filacchione et al., (2014) se hace la comparación de los resultados de temperatura de los anillos arrojados por los instrumentos VIMS y CIRS. VIMS (en español: Espectrómetro de Mapeo Visual e Infrarrojo) es un instrumento a bordo de Cassini, al igual que CIRS, que se especializa en identificar la composición química de una superficie, atmósfera o anillos de Saturno midiendo la energía visible e infrarroja. Las comparaciones de las observaciones de temperatura de VIMS y CIRS muestran que tienen las mismas tendencias de temperatura radial en los anillos A y B, y las temperaturas medidas por VIMS se encontraron más altas que las de CIRS en el anillo C y la División Cassini como consecuencia de la menor profundidad óptica y la contaminación resultante que crea un cambio en la composición del hielo de agua puro de estas regiones. En este artículo se encontraron las propiedades espectrales y la variabilidad de los perfiles radiales de temperatura con el ángulo de fase y el ángulo de elevación solar. Los resultados arrojados son más específicos que los que se pueden obtener con datos de CIRS: de acuerdo a las diferentes longitudes de onda y a la variabilidad del ángulo de fase se encontró que cuando se observa el espectro de los anillos en ángulos de fase altos, se observa un notable

aumento en el enrojecimiento del espectro a longitudes de onda visibles y en la banda de hielo de agua, esto probablemente se deba a contaminantes de color rojo mezclado con el hielo de agua. Para ángulos de fase bajos, los resultados son ligeras firmas espectrales que corresponden a compuestos orgánicos como el CH<sub>2</sub> (metileno).

Para simplificar, la composición de los anillos principales de Saturno se puede intuir con los datos del instrumento CIRS, pero se puede dar una idea más sólida con los datos del instrumento VIMS, que indica que las partículas contienen aproximadamente 90-95 % de hielo de agua mientras que el 5-10 % restante es consistente con diferentes contaminantes mezclados en el hielo de agua como el carbono amorfo o tolines, además de la hematita que es el resultado de la oxidación del hierro en los anillos debido a su tenue atmósfera de oxígeno. La mayor contaminación causada por el material meteorítico se observa en el anillo C y en la División Cassini, mientras que los bajos niveles de material alifático observados en las partículas de los anillos A y B son una evidencia de que son prístinos.

En resumen, el análisis de datos hechos gracias al instrumento CIRS de Cassini, arroja que hay variaciones en la temperatura al hacer variar las diferentes geometrías de observación y que están correlacionadas. La geometría de observación que más aportó información es el ángulo de elevación solar ( $B'$ ), ya que las partículas de los anillos cambian su temperatura de acuerdo a la posición respecto al Sol: la temperatura de las diferentes regiones de estudio disminuyeron conforme disminuyó el ángulo de elevación solar siendo los anillos A y B los que tuvieron la mayor disminución. La disminución en la temperatura se dio como resultado de la estructura y la dinámica que presentan las partículas, en éstos anillos se presenta una estructura vertical, donde las partículas se traslapan una con otra provocando una emisividad menor. El traslape de las partículas se genera debido a la mayor densidad de partículas en los anillos, a las resonancias que se crean y dan como resultado ondas de densidad provocando una mayor profundidad óptica. Las wakes que se forman en los anillos A y B son un factor muy importante en la disminución de la temperatura. Las gráficas de la variación del ángulo de

elevación solar coinciden con el modelo propuesto por Flandes et al., 2010 en donde se encuentran los valores del albedo para los anillos A, B y C como 0.59, 0.50 y 0.35-0.38, respectivamente, dando como idea que la composición de las partículas de los anillos es principalmente hielo de agua pero con alguna mezcla de contaminantes.

Las gráficas del ángulo de elevación solar vs temperatura tanto para el lado iluminado y no iluminado de los anillos muestran una diferencia en la temperatura ( $\sim 10\text{K}$ ), donde hay una disminución para el lado no iluminado de los anillos, esta disminución es la que da una idea de una estructura vertical en los anillos principales. Otra característica relevante es el hecho de que la temperatura del lado no iluminado de los anillos disminuye con  $B'$ , lo que sugiere que la energía solar que calienta el lado iluminado se transporta al lado no iluminado.

Las gráficas de la temperatura respecto a la variación del ángulo de fase dan como resultado un incremento exponencial de la temperatura cuando se toman ángulos de fase bajos ( $< 30^\circ$ ) en las regiones de los anillos A y B, éste es el resultado de la superposición de las partículas dentro de los anillos. A diferencia con las regiones del anillo C y la División Cassini, el incremento de la temperatura no es tan notable para ángulos pequeños debido a que son ópticamente delgados, aunque la variación de la temperatura se pueda deber al regolito de las partículas.

# Apéndice

## Apéndice 1

### **Localización y nomenclatura de los datos de archivo utilizados en la estructura de los anillos principales**

Las gráficas mostradas en el capítulo 7.1 que se relaciona con la estructura de los anillos principales, fueron obtenidas de diferentes datos de archivos:

- Los datos de profundidad óptica que se utilizaron fueron tomados de la siguiente liga: <http://pds-rings.seti.org/cassini/uvis/index.html>, que se encuentra en la página de la NASA, correspondiente al instrumento UVIS (Ultraviolet Imaging Spectrograph). Estas observaciones son el resultado de las ocultaciones estelares realizadas por el instrumento UVIS de Cassini, donde el investigador principal de este instrumento es el Dr. Larry Esposito. Las observaciones fueron obtenidas entre mayo del 2005 y agosto del 2008.
- Los detalles de los procesos involucrados en la producción del conjunto de datos están dentro de Colwell et.al., 2010, Cassini UVIS Stellar Occultation Observations of Saturn's Rings, AJ, Vol. 140, No. 6, pp. 1569-1578, 2010, DOI 10.1088/0004-6256/140/6/1569. (Colwell et.al., 2010).
- La nomenclatura de cada dato de archivo tomado por UVIS está definida de la siguiente forma:

Ejemplo: TheAra041\_PDS\_10km\_051310

nombre de archivo = sssrrr\_PDS\_nnnkm\_mmdddy

sss = abreviatura de la estrella ocultada.

rrr = número de revoluciones del orbitador Cassini.

PDS = indica que el archivo fue producida para PDS.

mmmkm = la resolución radial de los instrumentos utilizados.

mmddaa = fecha en que el archivo fue preparado.

## Apéndice 2

### Valores de las constantes utilizadas en la sección 6.2

Constante	Definición	Valor
$S_{\odot}$	Flujo solar sobre la Tierra	1370 $Wm^2$
$L$	Corrección en la hora local. $L = 0,5 [1 + \cos \Psi + \pi]$	3.84E-03
$\Omega$	Ángulo sólido, como se ve Saturno por las partículas.	0.266376
$\Gamma$	Distancia Saturno-Sol	9.58 UA
$A_s$	Albedo de Saturno	0.342
$\varepsilon$	Emisividad térmica de las partículas	1
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	5.67E-08 $Wm^{-2}K^{-4}$
$f$	Factor de velocidad de rotación de las partículas	2 (rotadores lentos)
$\pi$	Constante Pi	3.1415...
$T_s$	Temperatura de Saturno	~93K

# Bibliografía

- Allen, D. A. and Murdock, T. L. (1971). Infrared Photometry of Saturn, Titan, and the Rings. *Icarus*, 14:1–2.
- Altobelli, N., Spilker, L., Pilorz, S., Leyrat, C., Eddington, S., Wallis, B., and Flandes, A. (2009). Thermal phase curves observed in Saturn’s main rings by Cassini-CIRS: Detection of an opposition effect? *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 36:L10105.
- Altobelli, N., Spilker, L. J., Leyrat, C., and Pilorz, S. (2008). Thermal observations of Saturn’s main rings by Cassini CIRS: Phase, emission and solar elevation dependence. *Planetary and Space Science*, 56:134–146.
- Barreto, J. A. (2008). Radiación de un Cuerpo Negro. Ley de Emisión de Planck. Una Breve Introducción. Instituto de Astronomía-UNAM. <http://www.astroscu.unam.mx/tony/espanol/astrogal-7-cuerpo-negro.pdf>.
- Binney, J. and Tremaine, S. (1988). Galactic dynamics. 2nd. Ed. Toronto, Canadá. Princeton U Press. doi:10.1063/1.2811635. *Physics Today*, 41:113.
- Colwell, J. E., Esposito, L. W., Jerousek, R. G., Sremčević, M., Pettis, D., and Bradley, E. T. (2010). Cassini UVIS Stellar Occultation Observations of Saturn’s Rings. *The Astronomical Journal*, 140:1569–1578.

- Colwell, J. E., Esposito, L. W., and Sremčević, M. (2006). Self-gravity wakes in Saturn's A ring measured by stellar occultations from Cassini. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 33:L07201.
- Cuzzi, J. N., Burns, J. A., Durisen, R. H., and Hamill, P. M. (1979). The vertical structure and thickness of Saturn's rings. *Nature*, 281:202–204.
- de Pater, I., Gibbard, S. G., and Hammel, H. B. (2006). Evolution of the dusty rings of Uranus. *Icarus*, 180:186–200.
- de Pater, I. and Lissauer, J. J. (2001). Planetary Sciences. London. Cambridge University Press. ISBN 0521482194.
- Dougherty, M. K., Esposito, L. W., and Krimigis, S. M. (2009). Saturn from Cassini-Huygens. California, U.S.A. Springer. doi:10.1007/978-1-4020-9217-6.
- Durisen, R. H., Bode, P. W., Cuzzi, J. N., Cederbloom, S. E., and Murphy, B. W. (1992). Ballistic transport in planetary ring systems due to particle erosion mechanisms. II - Theoretical models for Saturn's A- and B-ring inner edges. *Icarus*, 100:364–393.
- Elliot, J. L., Dunham, E., and Mink, D. (1977). The rings of Uranus. *Nature*, 267:328–330.
- Esposito, L. (2014). Planetary Rings. Cambridge Planetary Science. Cambridge University Press; 1 edition. ISBN-10: 0521362229.
- Esposito, L. W., Cuzzi, J. N., Holberg, J. B., Marouf, E. A., Tyler, G. L., and Porco, C. C. (1984). Saturn's rings - Structure, dynamics, and particle properties. Tucson, AZ, University of Arizona Press, 1984, p. 463-545.
- Estrada, P. R. and Cuzzi, J. N. (1996). Voyager Observations of the Color of Saturn's Rings. *Icarus*, 122:251–272.
- Fernández, J. F. and Pujal, M. C. (2006). Iniciación a la física. Volumen 1. España. Editorial Reverté, S.A, ISBN: 84-291-4272-X.

- Ferrari, C., Galdemard, P., Lagage, P. O., Pantin, E., and Quoirin, C. (2005). Imaging Saturn's rings with CAMIRAS: thermal inertia of B and C rings. *Astronomy and Astrophysics*, 441:379–389.
- Ferrari, C. and Leyrat, C. (2006). Thermal emission of spherical spinning ring particles. The standard model. *Astronomy and Astrophysics*, 447:745–760.
- Filacchione, G., Ciarniello, M., Capaccioni, F., Clark, R. N., Nicholson, P. D., Hedman, M. M., Cuzzi, J. N., Cruikshank, D. P., Dalle Ore, C. M., Brown, R. H., Cerroni, P., Altobelli, N., and Spilker, L. J. (2014). Cassini-VIMS observations of Saturn's main rings: I. Spectral properties and temperature radial profiles variability with phase angle and elevation. *Icarus*, 241:45–65.
- Flandes, A. (2012). Luz y sombra en los anillos de Saturno. *¿Como Ves?*, 158:10–14.
- Flandes, A., Spilker, L., Morishima, R., Pilorz, S., Leyrat, C., Altobelli, N., Brooks, S., and Edgington, S. G. (2010). Brightness of Saturn's rings with decreasing solar elevation. *Planetary and Space Science*, 58:1758–1765.
- Flasar, F. M. (2014). The Saturn system viewed through the infrared eyes of Cassini CIRS. *European Planetary Science Congress 2014, EPSC Abstracts, Vol. 9, id. EPSC2014-70*, 9:EPSC2014-70.
- Flasar, F. M., Kunde, V. G., Abbas, M. M., Achterberg, R. K., Ade, P., Barucci, A., Bézard, B., Bjoraker, G. L., Brasunas, J. C., Calcutt, S., Carlson, R., Césarsky, C. J., Conrath, B. J., Coradini, A., Courtin, R., Coustenis, A., Edberg, S., Edgington, S., Ferrari, C., Fouchet, T., Gautier, D., Gierasch, P. J., Grossman, K., Irwin, P., Jennings, D. E., Lellouch, E., Mamoutkine, A. A., Marten, A., Meyer, J. P., Nixon, C. A., Orton, G. S., Owen, T. C., Pearl, J. C., Prangé, R., Raulin, F., Read, P. L., Romani, P. N., Samuelson, R. E., Segura, M. E., Showalter, M. R., Simon-Miller, A. A., Smith, M. D., Spencer, J. R., Spilker, L. J., and Taylor, F. W. (2004). Exploring The Saturn System In The Thermal Infrared: The Composite Infrared Spectrometer. *Space Science Reviews*, 115:169–297.

- Fletcher, L. N., Irwin, P. G. J., Teanby, N. A., Orton, G. S., Parrish, P. D., de Kok, R., Howett, C., Calcutt, S. B., Bowles, N., and Taylor, F. W. (2007). Characterising Saturn's vertical temperature structure from Cassini/CIRS. *Icarus*, 189:457–478.
- Flynn, B. C. and Cuzzi, J. N. (1989). Regular structure in the inner Cassini Division of Saturn's rings. *Icarus*, 82:180–199.
- Froidevaux, L. (1981). Saturn's rings - Infrared brightness variation with solar elevation. *Icarus*, 46:4–17.
- Gehrels, T. and Matthews, M. S. (1984). Saturn. Tucson, AZ, University of Arizona Press. ISBN 0-8165-0829-1.
- Goldreich, P. and Tremaine, S. D. (1978). The formation of the Cassini division in Saturn's rings. *Icarus*, 34:240–253.
- Greenberg, R. and Brahic, A. (1984). Planetary rings. Tucson, AZ, University of Arizona Press, 801 p.
- Grossman, A. W. (1990). *Microwave imaging of Saturn's deep atmosphere and rings*. PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena.
- Hanel, R., Crosby, D., Herath, L., Vanous, D., Collins, D., Creswick, H., Harris, C., and Rhodes, M. (1980). Infrared spectrometer for Voyager. *Applied Optics*, 19:1391–1400.
- Kawata, Y. (1983). Infrared brightness temperature of Saturn's rings based on the inhomogeneous multilayer assumption. *Icarus*, 56:453–464.
- Kawata, Y. and Irvine, W. M. (1975). Thermal emission from a multiple scattering model of Saturn's rings. *Icarus*, 24:472–482.
- Kitchin, C. R. (1987). Stars, nebulae and the interstellar medium. Observational physics and astrophysics. Bristol: Hilger. CRC Press. ISBN-13: 978-0852745816.

- Leyrat, C., Ferrari, C., Charnoz, S., Decriem, J., Spilker, L. J., and Pilorz, S. (2008a). Spinning particles in Saturn's C ring from mid-infrared observations: Pre-Cassini mission results. *Icarus*, 196:625–641.
- Leyrat, C., Spilker, L. J., Altobelli, N., Pilorz, S., and Ferrari, C. (2008b). Infrared observations of Saturn's rings by Cassini CIRS : Phase angle and local time dependence. *Planetary and Space Science*, 56:117–133.
- Marouf, E. A., Tyler, G. L., and Rosen, P. A. (1986). Profiling Saturn's rings by radio occultation. *Icarus*, 68:120–166.
- Matson, D. L., Spilker, L. J., and Pierre, J. (1996). THE CASSINI-HUYGENS MISSION. Overview, Objectives and Huygens Instrumentarium. Vol.1. University of California, California, U.S.A. Springer. ISBN 978-90-481-6208-6.
- Maxwell, J. C. (1859). On the stability of the motion of Saturn's rings. Cambridge, London, Macmillan and Co. doi:10.3931/e-rara-244.
- McFadden, L.-A. A., Weissman, P. R., and Johnson, T. V. (2007). Encyclopedia of the solar system. 2nd Ed. Canadá. Elsevier. ISBN-10: 0-12-088589-1.
- McNaught, A. D. and Wilkinson, A. (1997). Iupac. compendium of chemical terminology, 2nd ed. (the "gold book"). oxford. blackwell scientific publications.
- Miner, E. D., Wessen, R. R., and Cuzzi, J. N. (2007). Planetary Ring Systems. California, U.S.A. Popular Astronomy. Springer. doi: 10.1007/978-0-387-73981-6.
- Monedero, J. I. (2015). Simulación visual de la iluminación: Teoría, técnicas, análisis de casos. España. Iniciativa Digital Politécnica. ISBN: 978-84-9880-545-1. .
- Morishima, R., Salo, H., and Ohtsuki, K. (2009). A multilayer model for thermal infrared emission of Saturn's rings: Basic formulation and implications for Earth-based observations. *Icarus*, 201:634–654.

- Murphy, R. E. (1973). Temperatures of Saturn's Rings. *Astrophysical Journal*, 181:L87.
- Nolt, I. G., Barrett, E. W., Caldwell, J., Gillett, F. C., Murphy, R. E., Radostitz, J. V., and Tokunaga, A. T. (1980). IR brightness and eclipse cooling of Saturn's rings. *Nature*, 283:842.
- Ostro, S. J., Pettengill, G. H., and Campbell, D. B. (1980). Radar observations of Saturn's rings at intermediate tilt angles. *Icarus*, 41:381–388.
- Pacholczyk, A. G. (1979). Radioastrofísica: procesos no térmicos en fuentes galácticas y extragalácticas. española. editorial reverté, s.a. isbn: 84-291-4146-4.
- Resnick, R., Halliday, D., and Krane, K. S. (2001). Física (Francisco Andión, trad.) México: Continental. Vol. 1. 4ta ed. ISBN:0-471-80458-4.
- Ridpath, I. (2004). Diccionario de astronomía. española. complutense. isbn: 84-89784-70-1.
- Salo, H. and Karjalainen, R. (2003). Photometric modeling of Saturn's rings. I. Monte Carlo method and the effect of nonzero volume filling factor. *Icarus*, 164:428–460.
- Simon-Miller, A. A., Conrath, B. J., Gierasch, P. J., Orton, G. S., Achterberg, R. K., Flasar, F. M., and Fisher, B. M. (2006). Jupiter's atmospheric temperatures: From Voyager IRIS to Cassini CIRS. *Icarus*, 180:98–112.
- Smith, A. G. (1969). Radioexploracion del sol. méxico, méxico. editorial reverté mexicana, s.a. isbn: 8429184155, 9788429184150.
- Smith, B. A., Soderblom, L. A., Johnson, T. V., Ingersoll, A. P., Collins, S. A., Shoemaker, E. M., Hunt, G. E., Masursky, H., Carr, M. H., Davies, M. E., Cook, A. F., Boyce, J. M., Owen, T., Danielson, G. E., Sagan, C., Beebe, R. F., Veverka, J., McCauley, J. F., Strom, R. G., Morrison, D., Briggs, G. A., and Suomi, V. E. (1979). The Jupiter system through the eyes of Voyager 1. *Science*, 204:951–957.

- Spilker, L., Ferrari, C., Cuzzi, J. N., Showalter, M., Pearl, J., and Wallis, B. (2003). Saturn's rings in the thermal infrared. *Planetary and Space Science*, 51:929–935.
- Spilker, L. J., Pilorz, S. H., Wallis, B. D., Edgington, S. G., Brooks, S. M., Pearl, J. C., and Flasar, F. M. (2005). Saturn Ring Temperature Roll-off at Submillimeter Wavelengths From Cassini CIRS Observations. *AGU Spring Meeting Abstracts*.
- Spilker, L. J., Pilorz, S. H., Wallis, B. D., Pearl, J. C., Cuzzi, J. N., Brooks, S. M., Altobelli, N., Edgington, S. G., Showalter, M., Michael Flasar, F., Ferrari, C., and Leyrat, C. (2006). Cassini thermal observations of Saturn's main rings: Implications for particle rotation and vertical mixing. *Planetary and Space Science*, 54:1167–1176.
- Zeljko, I. (2005). Disk dynamics: Spiral arms and bars as instabilities. astr 509: Astrophysics iii: Stellar dynamics, university of washington.