



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Estructura, composición y dinámica de los anillos
principales de Saturno a partir de sus gradientes de
temperatura

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Físico

PRESENTA:

ARTURO TORRES AMADOR

DIRECTOR

Dr. JOSÉ ALBERTO FLANDES MENDOZA



Ciudad Universitaria, CD.MX., 2023



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.

Hoja de Datos del Jurado

1. Datos del alumno

Torres
Amador
Arturo
55 3738 6635
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Físico
093551621

2. Datos del tutor

Dr.
José Alberto
Flandes
Mendoza

3. Datos sinodal 1

Dra.
Patricia
Goldstein
Menache

4. Datos sinodal 2

Dr.
Leonardo Javier
Sánchez
Peniche

5. Datos sinodal 3

Dr.
José Antonio
García
Barreto

6. Datos sinodal 4

Dr.
Alejandro
Lara
Sánchez

7. Datos del trabajo escrito

Estructura, composición y dinámica de los anillos principales de Saturno a partir de sus gradientes de temperatura
84 p
2023

Agradecimientos

*No pertenezco a los prados negros
ni a los árboles de follaje luminoso
ni a las veredas limpias.
Me asustan los paraísos fragmentados,
los cielos que no existen
la palabra que insiste ante la acción fallida
la mentira hecha verdad.
Amo el conocimiento, lo auténtico... lo inolvidable.*

A lo largo de mi vida he llegado a valorar el tiempo.

Tiempo me dedicaron en familia y eso me lleno de agradecimiento, años después el mismo tema, *el tiempo*, fue discutido en la Universidad, con su relatividad e inexistencia, lo más curioso es que en él vivimos días radiantes y días miserables, que a la postre resultan inolvidables.

Un agradecimiento especial a mi padre, madre y hermanos.

Dr. Alberto Flandes, gracias por toda su ayuda, lo que pueda escribir para usted es poco, gracias por su tiempo.

Agradezco a cada uno de los sinodales que revisaron este trabajo y aportaron un punto de vista riguroso y cálido, como fue el sello de los cursos de mi querida FCUNAM.

Gracias por su tiempo:

Dra. Patricia Golstein Menache, Depto. Física, Facultad de Ciencias, UNAM.

Dr. Leonardo Javier Sánchez Peniche, Instituto de Astronomía, UNAM.

Dr. José Antonio García Barreto, Instituto de Astronomía, UNAM

Dr. Alejandro Lara Sánchez, Instituto de Geofísica, Depto. Ciencias Espaciales, UNAM.

Gracias a todos aquellos que con su tiempo me han demostrado que confiaron.

Esta tesis fue realizada en el Instituto de Geofísica y fue apoyada a través del proyecto DGAPA-PAPIIT IN104721.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	VI
1. Introducción	1
Introducción	1
1.1. Antecedentes históricos	1
1.2. Relevancia del estudio de los anillos	3
2. Sistemas anulares en el Sistema Solar	5
Sistemas anulares en el Sistema Solar	5
2.1. Cinturón de asteroides	5
2.2. El cinturón de Kuiper	5
2.3. Los anillos de los planetas gigantes	6
2.3.1. Los anillos de Júpiter	7
2.3.2. Los anillos de Urano	7
2.3.3. Los anillos de Neptuno	9
2.4. Anillos en cuerpos menores	10
2.5. Galaxias	11
3. La misión Cassini	13
La misión Cassini	13
3.1. Instrumentación	15

3.2.	Instrumentos relevantes para el estudio de los anillos principales	15
3.2.1.	Espectrómetro Compuesto Infrarrojo, CIRS	15
3.2.2.	Espectrómetro UVIS	17
3.2.3.	Espectrómetro VIMS	17
3.2.4.	Analizador de polvo cósmico, CDA	18
4.	Aspectos generales de los anillos de Saturno	20
	Aspectos generales de los anillos de Saturno	20
4.1.	Componentes principales del sistema de anillos	21
4.2.	Aspectos dinámicos generales de los anillos principales	24
4.2.1.	Cuñas radiales (<i>Spokes</i>)	24
4.2.2.	Ondas de densidad (<i>Density Waves and bending waves</i>)	24
4.2.3.	Estelas o barras autogravitantes (<i>Self-Gravity wakes</i>)	25
4.2.4.	Propelas (<i>Propellers</i>)	25
4.3.	Los anillos de Saturno en comparación con los demás sistemas de anillos	28
5.	Antecedentes de los estudios térmicos de los anillos principales de Saturno	30
	Antecedentes de los estudios térmicos de los anillos de Saturno	30
5.1.	Modelo de Kawata, 1975.	31
5.2.	Modelo de Froidevaux, 1981.	32
5.3.	Modelo Morishima, 2009.	35
5.4.	Modelo híbrido	36
6.	Datos utilizados en esta tesis	42
	Datos utilizados en esta tesis	42
6.1.	Geometría de observación	42
6.2.	Detalles sobre los datos del espectrómetro CIRS	44
6.3.	Datos del espectrómetro UVIS	47
7.	Variación de temperatura con respecto a la profundidad óptica	48

Variación con respecto a la profundidad Óptica	48
8. Variaciones con respecto al ángulo de elevación solar, B'	53
Variaciones con respecto al ángulo de elevación solar	53
8.1. Anillo C	53
8.2. Anillo B	53
8.3. Anillo CD	55
8.4. Anillo A	55
9. Variaciones de temperatura entre el lado iluminado y el lado oscuro	56
Variaciones de temperatura entre el lado iluminado y no iluminado	56
9.1. Anillo C	62
9.2. Anillo B	62
9.3. Anillo CD	62
9.4. Anillo A	62
10. Variaciones con respecto al ángulo de fase	63
Variaciones con respecto al ángulo de fase	63
10.1. Anillo C	67
10.2. Anillo B	67
10.3. Anillo CD	67
10.4. Anillo A	67
11. Variaciones de temperatura con respecto al terminador	68
Variaciones de temperatura con respecto al terminador	68
11.1. Anillo C:	70
11.2. Anillo B	71
11.3. Anillo A	71
12. Discusión	72

Discusión	72
12.1. Estructura	72
12.2. Dinámica	74
12.3. Composición	75
13. Conclusiones	77
Conclusiones	77
Bibliografía	79

Resumen

Los anillos principales de Saturno son un conjunto de cuerpos cubiertos de hielo o probablemente de hielo y contaminantes que orbitan Saturno desde 1.3 (anillo C) hasta 2.2 (anillo A) radios planetarios. Estos anillos y todo el sistema que rodea a Saturno se consideran un laboratorio de estudio comparable a un sistema planetario en miniatura. La multitud de procesos que se llevan a cabo en los anillos, por ejemplo, resonancias, ondas de densidad y bombardeo de micrometeoroides de hipervelocidad, así como la continua acreción y fraccionamiento de sus componentes por fuerzas de marea hacen que su estudio sea muy complejo. A pesar de los múltiples estudios a lo largo de siglos, sigue siendo un misterio, cómo se formaron o cuál es su composición real interna.

Aparte del estudio de los anillos a través de modelos dinámicos, por ejemplo de N-cuerpos, se han implementado estudios térmicos desde la detección de su emisión térmica en 1971 Allen y Murdock (1971). La ventana natural de estudio de los anillos es el infrarrojo porque su temperatura promedio está alrededor de los ~ 90 K y, en particular el estudio de las variaciones de temperatura en los anillos ha demostrado proveer información valiosa de su estructura, su composición y su dinámica.

En esta tesis estudiamos las variaciones más relevantes de temperatura en los anillos principales de Saturno y de cuyo estudio puede extraerse información útil con la cual se puede conocer más de su composición, su estructura y su dinámica.

Asumimos que los anillos se componen de conjuntos de partículas similares que emiten radiación electromagnética según la ley de Planck; y que su temperatura se debe a la energía que reciben del Sol y de Saturno. Por tanto, la temperatura de cada partícula estará modulada por su posición radial y azimutal en los anillos y de la posición relativa de Saturno con respecto al Sol. Sin embargo, su temperatura también dependerá de su composición química y su estructura. La posición que tenga cada partícula en los anillos definirá si se encuentra en una zona de mayor o menor densidad de partículas que puede expresarse en términos de la profundidad óptica (τ).

Específicamente, estudiamos las variaciones de temperatura con la elevación solar (B'), con el ángulo de fase (α), en el terminador de la sombra de Saturno sobre los anillos y entre el lado oscuro y el lado iluminado del plano de los anillos usando datos obtenidos por la nave *Cassini* que orbitó Saturno entre julio de 2004 y septiembre de 2017. En particular nos enfocamos en los datos del Espectrómetro Compuesto Infrarrojo, CIRS (por sus siglas en inglés).

Ciertamente la distancia de Saturno al Sol es determinante, pero hay factores geométricos, estructurales y dinámicos involucrados. Por ejemplo:

Las regiones más densas de los anillos guardan mayores diferencias de temperatura entre el lado oscuro e iluminado, por ejemplo, de casi 23 K para la elevación solar máxima (22°) en el caso del anillo B en su porción ópticamente más gruesa ($\tau > 4$). En contraste, se observan menores diferencias de temperatura (≈ 5 K) en el caso del anillo C que es un anillo ópticamente delgado ($\tau < 0.1$).

Las variaciones de temperatura siguen un perfil exponencial decreciente con el ángulo de fase, α , tal que la variación más notable se da sí $\alpha < 30^\circ$.

En general, concluimos que las variaciones de temperatura (ΔT) entre las diferentes regiones se deben principalmente a los siguientes factores:

La inclinación estacional de los anillos determina en gran medida cuanta energía solar llega a cada región de los anillos.

Las diferencias en la profundidad óptica local de las diferentes regiones que evidencian su estructura y dinámica. En los anillos ópticamente gruesos (A y B) la temperatura es más baja que en los anillos ópticamente delgados (División de Cassini y C), ya que el efecto de eclipsamiento es determinante para la energía que recibe cada partícula en las diferentes zonas del anillo.

A la temperatura similar constante de las partículas en los anillos que sugiere una estructura química basada en la molécula de H_2O .

Las rotación de las partículas dentro del anillo que corresponde a una rotación intermedia y que asociadas a la inercia térmica baja tienen un impacto relevante en la temperatura de los anillos.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes históricos

La característica más notable del planeta Saturno es, sin duda, su sistema de anillos: brillantes, espectaculares, asombrosos. Un todo, que representa un reto para la astrofísica planetaria. En julio de 1610, Galileo Galilei (Italia, 1564-1642) apuntó su telescopio al cielo. En particular, hacia una de las estrellas errantes: Saturno. El telescopio, de tan sólo 20 aumentos sería una limitante importante para determinar claramente lo que observaba. Si agregamos además la posición de Saturno con respecto a la Tierra, la conclusión de Galileo de considerar a los anillos como cuerpos ajenos que flanqueaban al planeta, no nos debe parecer tan descabellada.

Un par de años después, en 1612, Saturno presentaba una posición diferente con respecto a la Tierra. Los anillos se encontraban de canto, hoy diríamos en el equinoccio. La súbita desaparición de los *cuerpos* que antes había observado causó enorme sorpresa en el genial Galileo. Esta aparente desaparición de los cuerpos que flanqueaba a Saturno parecía no tener explicación y ésta no llegó a la vida de tan ilustre científico. Sin embargo, la semilla ya estaba puesta. Hombres, telescopios y naves espaciales en sinergia asombrosa, se dedicarían a explicar lo que Galileo vió desde aquel lejano 1610 y hasta nuestros días.



Figura 1.1: De izquierda a derecha. Secuencia de ilustraciones de Galileo, Huygens y Cassini. Composición elaborada por el autor.

Después de Galileo, el estudio de la estructura de los anillos de Saturno continuó con Giuseppe Campani (Italia, 1635-1715) quien observó, en 1664, que la mitad de uno de los anillos era más brillante



Figura 1.2: Saturno y sus anillos. La imagen de la izquierda fue tomada por la nave *Voyager 1*, el 16 de noviembre de 1980 (NASA/JPL), la imagen del centro es una composición en color natural de fotos tomadas por la nave *Cassini* a principios de octubre de 2004 (NASA/JPL/Space Science Institute) y la imagen de la derecha es de junio del 2023 en el infrarrojo por el telescopio James Webb (NASA, ESA, CSA, JWST Saturn team).

que la otra. Giovanni Domenico Cassini (1625-1712), francés, de origen italiano, observó, en 1675, una banda oscura y débil que dividía a los anillos y que interpretó como un *hueco*.

Observaciones cuidadosas llevaron a William Herschel (1738-1822, Alemania-Gran Bretaña) a confirmar tal hecho en 1791. En 1837, Johann Franz Encke (1791-1865, Estados Unidos) observó que la mitad del anillo A aparecía más débil en su interior que en su exterior, pero no fue sino hasta 1888 que James Edward Keeler (1857-1900, Estados Unidos) observó la ahora llamada brecha de Keeler que se observa angosta y bien definida en el borde exterior del anillo A. Los anillos más ténues fueron descubiertos en 1850 por William Bonds (1789-1859, Estados Unidos) y George Bonds (1825-1865, Estados Unidos) e independientemente por W. R. Daves. La estructura de los anillos fue esclarecida por el trabajo de varios científicos: en 1785 Pierre Simon de Laplace (1749-1827, Francia) demostró que un anillo sólido sería inestable, lo cual condujo a pensar que los anillos eran una estructura formada por muchos miles de partículas. El último paso hacia la visión moderna de los anillos se dió en 1857, cuando James Clerk Maxwell (1831-1879, Reino Unido) ganó el Premio Adams de la Universidad de Cambridge por su demostración matemática de que los anillos delgados estaban formados, en realidad, por numerosos objetos (de baja masa) que mantenían órbitas independientes (tipo Kepler). La comprobación experimental de esta hipótesis llegó en 1895, cuando los astrónomos James E. Keeler (1857-1900, Estados Unidos) y William W. Campbell (1862-1938, Estados Unidos) dedujeron la velocidad de las partículas en los anillos, aproximadamente 18000 m/s, a partir de su desplazamiento Doppler, o modificación de la longitud de onda de las líneas espectrales de la luz del Sol que las partículas reflejan hacia la Tierra. En 1866 Daniel Kirwood (1814-1895, Estados Unidos) fue el primero en sugerir que la División de Cassini es producto de una resonancia con una de las lunas de Saturno (Mimas).

En 1911, Henri Poincaré (1854-1912, Francia) encuentra evidencia importante de las mutuas colisiones inelásticas entre las partículas del disco, lo que produce aplanamiento del mismo. En la década de los setenta del siglo pasado y con el advenimiento de las computadoras, André Brahic (1942-2016, Francia) en 1975, confirma numéricamente que una nube de partículas en rotación alrededor de un cuerpo central se aplanan rápidamente en un disco muy delgado. Las naves *Pioneer 11* (1979) y *Voyager 1* y *2* (1980, 1981) pasaron cerca de Saturno y descubrieron tres nuevos anillos, designados D,

F y G, así como varias pequeñas lunas que se movían junto con los anillos y que denominaron *lunas pastoras*. Con este acercamiento, se tuvo una imagen más detallada de los anillos por vez primera. Las imágenes tomadas por ocultación estelar y por radio ocultación se han catalogado ampliamente, desde 1987. Finalmente, con el arribo de la nave Cassini en 2004 se obtuvieron fotografías aún más cercanas y de más alta resolución.

En octubre de 2009 con ayuda del Telescopio Espacial *Spitzer* se descubrió el anillo más externo de Saturno, Hamilton (2010), el cual se localiza a una distancia de entre 4 y 13 millones de kilómetros del centro de Saturno.

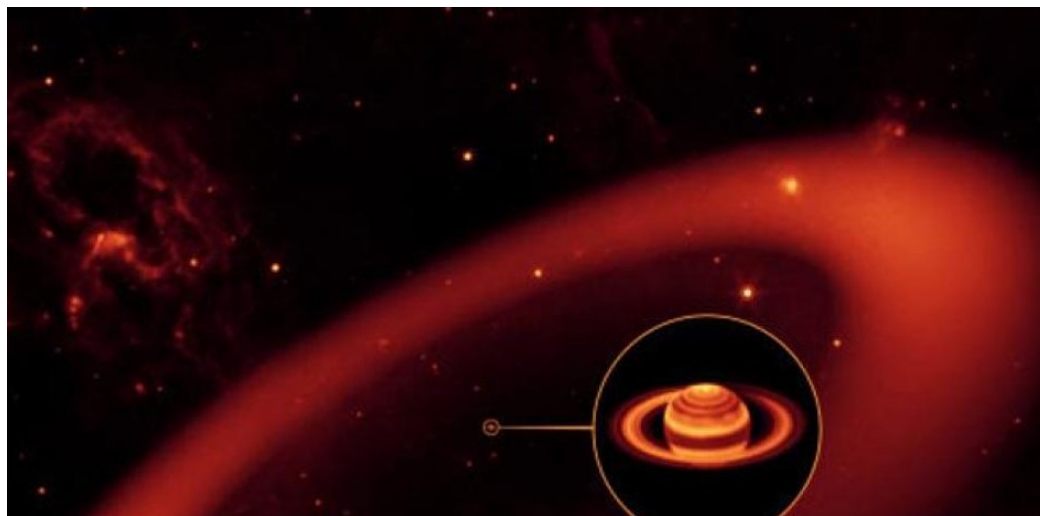


Figura 1.3: Imagen artística del anillo *Phoebe*. Los investigadores Hamilton, Verbiscer y Skrutskie, descubrieron este anillo en 2009 utilizando el telescopio espacial *Spitzer*. Utilizaron datos del Explorador Espacial Infrarrojo de Campo Amplio de la NASA para descubrir que este anillo se extiende hasta una distancia de 270 radios de Saturno, lo que lo convierte en el mayor anillo planetario conocido del Sistema Solar.

1.2. Relevancia del estudio de los anillos

El conocer la génesis y dinámica de estas estructuras, nos ayuda a entender cómo funcionan las estructuras anulares astrofísicas en general, que al parecer son recurrentes en el universo, ya sean anillos, cinturones o aún galaxias espirales. Formaciones como las nebulosas protoplanetarias y estelares, así como las galaxias con sus brazos espirales, son ejemplos de este comportamiento. A partir de principios generales de dinámica se establecen las bases bajo los cuales se pueden generar dichos comportamientos de la materia y además sus particularidades locales, como pueden ser la densidad, la temperatura, equilibrio energético, extensión y grosor de tales sistemas.

El estudio de las estructuras anulares planetarias, estelares y galácticas es importante para conocer sus parámetros básicos (dimensiones, extensión, espesor, etcétera) y tratar de entender su origen. Estos

sistemas anulares, parece, tienen un mecanismo de funcionamiento similar, pero aún faltan muchos detalles por desvelar.

En el caso de Saturno, el diferente color de cada anillo indica una densidad y/o composición diferente, y lo más interesante, sin duda, son las dimensiones (ancho, alto) y distancia al planeta.

Desde una perspectiva simple, la pregunta más natural que surge es ¿cómo y por qué se formaron esas estructuras anulares? Preguntas secundarias, pero igualmente importantes, tienen que referirse a una masa crítica, velocidades de rotación, tamaños mínimos y máximos del material en rotación, procesos de captura del material circundante, edad de los anillos, estabilidad del sistema y su ulterior desarrollo.

Respecto a la edad de los anillos, la publicación de Kempf *et al.* (2023), establece un intervalo para la edad de estos. Sí se conoce el flujo de masa contaminante que entra a los anillos, se puede estimar el tiempo de exposición de los anillos, proporcionando un límite para su edad. Utilizando el CDA (*Cosmic Dust Analyzer*), ver sección 3.2.4, de la nave Cassini, se midió el flujo de micrometeoroides en el sistema de anillos de Saturno, un flujo dominado por objetos de baja velocidad relativa y procedentes de cinturón de Kuiper, con valores entre $6.9 \cdot 10^{-17}$ y $2.7 \cdot 10^{-16}$ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de lo cual se infiere un tiempo de exposición \lesssim 100 a 400 millones de años.

Las simulaciones por computadora pueden crear anillos virtuales. De esta forma se puede evaluar su comportamiento y comparar con la información que proporcionan las naves espaciales o las observaciones terrestres. Las simulaciones más comunes tratan de reproducir el movimiento de las partículas que los componen a partir de la fuerza atractiva central (que depende de la masa y de la distancia) y de las velocidades de traslación.

Algunas simulaciones más sofisticadas incluyen las fuerzas gravitacionales entre las partículas que forman cada anillo (Porco, 1983). Lo interesante es que estas simulaciones son esencialmente similares a las que se usan para explicar la formación del sistema Solar y de las galaxias.

Otras simulaciones consideran la interacción de la radiación con las partículas (Flandes *et al.*, 2021, 2010), (Flandes y García-Reyes, 2021)), por ejemplo, la absorción y la reflexión. Considerando estas dos características se puede obtener información más detallada acerca del material del cual está hecho el anillo. Esta técnica se utiliza en las películas de animación tridimensional y se basa en el rastreo de haces o *ray tracing*. El efecto es un sorprendente realismo en la imagen que se contempla.

Capítulo 2

Sistemas anulares en el Sistema Solar

En el sistema solar, además de los anillos de Saturno, Júpiter, Urano y Neptuno, existen otras estructuras que pueden considerarse estructuras anulares como el cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter, el cinturón de Kuiper más allá de Neptuno, entre 30 y 50 UA ¹ y la Nube Zodiacal compuesta de partículas de polvo en la región interna del sistema solar.

2.1. Cinturón de asteroides

El cinturón de asteroides es un disco que se encuentra entre las órbitas de Marte y Júpiter. En él se encuentran objetos denominados asteroides (más pequeño que un planeta y más grande que un meteoróide). Entre los objetos de mayor diámetro están Ceres (957 km), Pallas (524 km), Vesta (512 km), Higia (444 km), Interamnia (329 km) y Eunomia (320 km).

2.2. El cinturón de Kuiper

Es un disco circunestelar en el Sistema Solar exterior, que se extiende desde la órbita de Neptuno 30 UA, hasta aproximadamente 50 UA del Sol. Es similar al cinturón de asteroides, pero es mucho más grande: 20 veces más ancho y de 20 a 200 veces más masivo. Al igual que el cinturón de asteroides, se compone principalmente de pequeños cuerpos o restos de la etapa de formación del Sistema Solar. Si bien muchos asteroides están compuestos principalmente de roca y metal, la mayoría de los objetos del cinturón de Kuiper están compuestos principalmente de volátiles congelados (denominados *hielos*), como metano, amoníaco y agua. El cinturón de Kuiper alberga tres planetas enanos reconocidos oficialmente: Plutón, Haumea y Makemake. Algunas de las lunas del Sistema Solar, como Tritón de Neptuno y Febe de Saturno, podrían haberse originado en esta región.

¹Una Unidad Astronómica (UA) es una unidad de distancia, se define como la distancia media entre el Sol y la Tierra, es decir, 149 597 870 700 m = 149 597 870.7 km

2.3. Los anillos de los planetas gigantes

Los planetas gigantes del sistema solar Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno poseen sistemas de anillos. Sin embargo, el sistema de Saturno es el más complejo desde el punto de vista de la física involucrada, no es casual que sea el sistema anular más investigado. Los anillos se componen de una multitud de partículas de hielo de agua, principalmente, seguidos de roca y polvo de varios tamaños que van desde las micras hasta las decenas de metros. Cada sistema tiene sus particularidades, pero todos comparten ciertas características generales, por ejemplo, los anillos se encuentran dentro del límite de Roche² de cada planeta, tienen lunas pastoras y las resonancias entre ellas son importantes para estas estructuras estelares.

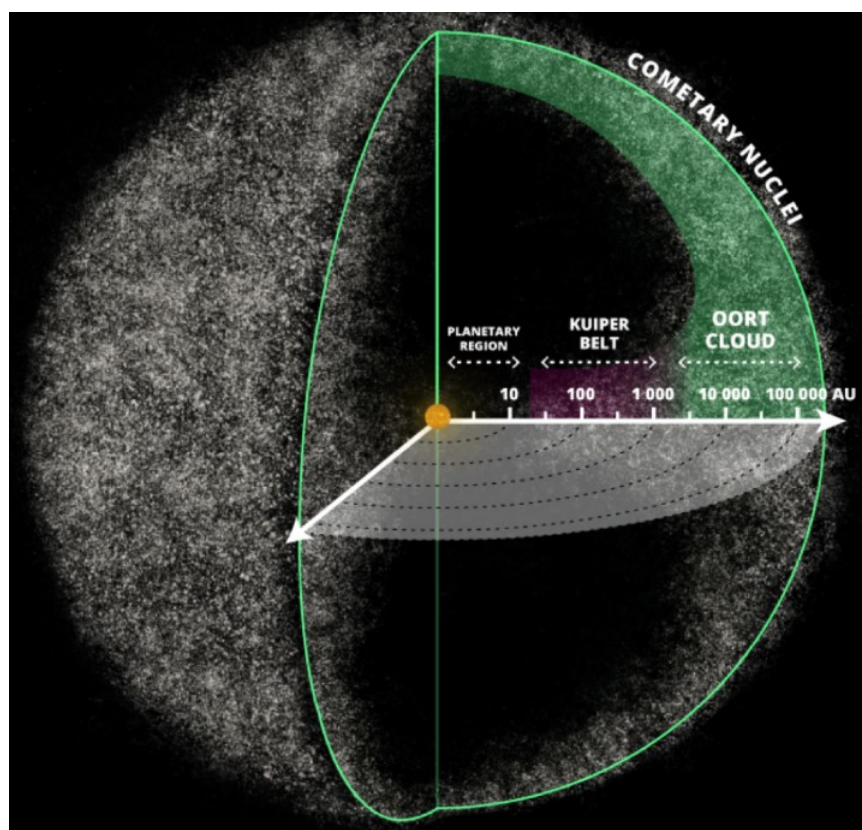


Figura 2.1: El cinturón de asteroides, el cinturón de Kuiper y la nube de Oort. Representación gráfica sin escala. Tomado del blog Transformando el Infierno.

²El límite de Roche es la distancia mínima a la que se ubica un cuerpo orbitando alrededor de otro más masivo sin que se fracture.

2.3.1. Los anillos de Júpiter

El sistema de anillos de Júpiter fue el tercer sistema de anillos descubierto en el Sistema Solar: 7 marzo de 1979. Estos anillos son tenues y se componen fundamentalmente de polvo micrométrico que ha sido dispersado por los impactos de micrometeoroides en las lunas Amaltea, Adrastea, Tebe y Metis. El sistema puede dividirse en cuatro estructuras: en el interior, un grueso toro de partículas conocido como el halo o el anillo halo, un anillo principal relativamente brillante y dos anillos anchos, gruesos y débiles, el anillo Difuso de Tebe y el Anillo Difuso de Amaltea. Imágenes de alta resolución obtenidas en febrero de 2007 por la sonda *New Horizons* revelaron una rica y fina estructura en el anillo principal.

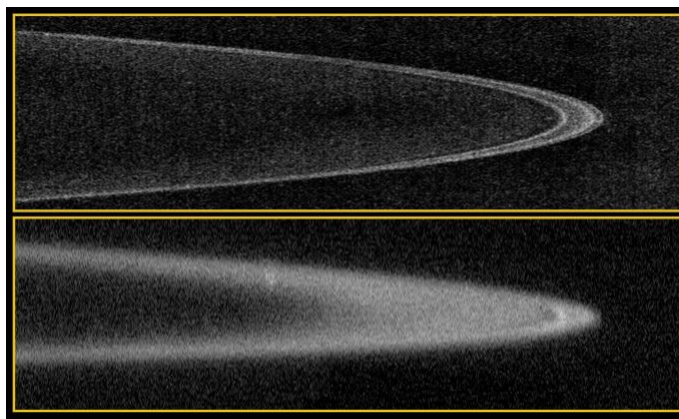


Figura 2.2: Los anillos del planeta Júpiter. NASA/John Hopkins University, Applied Physics Laboratory/South West Research Institute.

La masa total del sistema de anillos jovianos, incluyendo los cuerpos no observados que generan material para los anillos, no está exactamente determinada, pero es probable que esté en el rango de 10^{11} a 10^{16} kg. La edad del sistema de anillos no es conocida, aunque se manejan dos opciones: la primera es que posiblemente hayan existido desde la formación del planeta y la segunda es que tienen alrededor de 60 millones de años.

2.3.2. Los anillos de Urano

Este sistema fue descubierto el 10 de marzo de 1977 por los estadounidenses James Elliot, Edward W. Dunham y Douglas J. Mink, (Dunham *et al.*, 1977).

La primera observación del sistema de anillos de Urano se efectuó en un vuelo con destino a la ciudad australiana de Perth a cargo del avión especial de la NASA dedicado a la astronomía aérea, *Kuiper Airborne Observatory* (KAO). El propósito principal consistía en colocar un telescopio infarrojo a una altura de 12500 metros, para observar la primera ocultación predicha del planeta con la estrella SAO 158687.

Históricamente, William Herschel anunció, hace más de doscientos años, el descubrimiento de los anillos, aunque es poco creíble debido a las limitaciones técnicas de los telescopios de entonces.

En 1986 se descubrieron dos anillos más en imágenes logradas por la sonda *Voyager 2*, (Miner *et al.*, 2007).

En 2003-2005 se encontraron dos anillos más externos mediante análisis de imágenes tomadas por el Telescopio Espacial Hubble. Las exposiciones prolongadas de Urano tomadas con el telescopio espacial Hubble revelan dos lunas pequeñas y dos anillos débiles. Las lunas y los anillos orbitan fuera del sistema de anillos (principal) de Urano conocido hasta ahora, pero se encuentran al interior de las órbitas de lunas mayores conocidas. La luna exterior, U XXVI Mab, orbita a aproximadamente el doble del radio de los anillos principales y comparte su órbita con un anillo de polvo. La segunda luna, U XXVII Cupido, orbita más interior a la órbita del satélite Belinda. Un segundo anillo cae entre las órbitas de Porcia y Rosalinda, en una región sin cuerpos *frente* conocidos. En conjunto, constituyen un sistema dinámico densamente empaquetado, de rápida variación y posiblemente inestable, (Showalter y Lissauer, 2006). Hasta el año de 2009 se conocen 13 anillos diferentes ligados a este sistema.

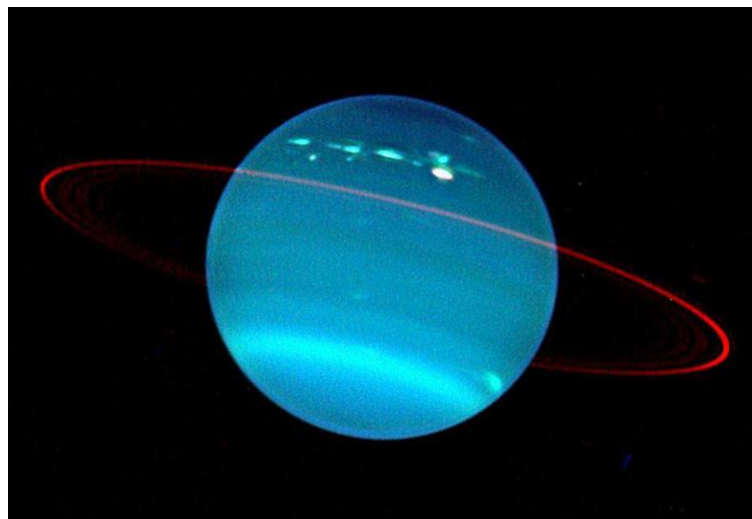


Figura 2.3: Los anillos del planeta Urano. Tomado con el telescopio Keck NIRC-2, en el cercano infrarrojo, 11/12 de julio de 2004 UT.

En orden creciente de su distancia al planeta se designan con la notación $1986U2R/\zeta, 6, 5, 4, \alpha, \beta, \eta, \gamma, \delta, \lambda, \epsilon, \nu$, y μ . Sus radios oscilan entre distancias de 38 000 km del anillo ζ y los 98 000 km del anillo μ . El albedo de Bond ³ de las partículas que forman el anillo no excede del 2%. Se cree que estos anillos son relativamente jóvenes y que su antigüedad no es mayor a 600 millones de años.

³El albedo de Bond se define como la radiación total reflejada de un objeto, comparada con la radiación incidente del Sol.

2.3.3. Los anillos de Neptuno

Es de 1846 la primera mención de anillos alrededor de Neptuno cuando Willian Lassell (1799-1880, Reino Unido) ver (Miner *et al.*, 2007), descubridor del mayor satélite de Neptuno, Tritón, informó de la presencia de un anillo alrededor del planeta. Su observación nunca fue confirmada y fue probablemente debida a una ilusión óptica.

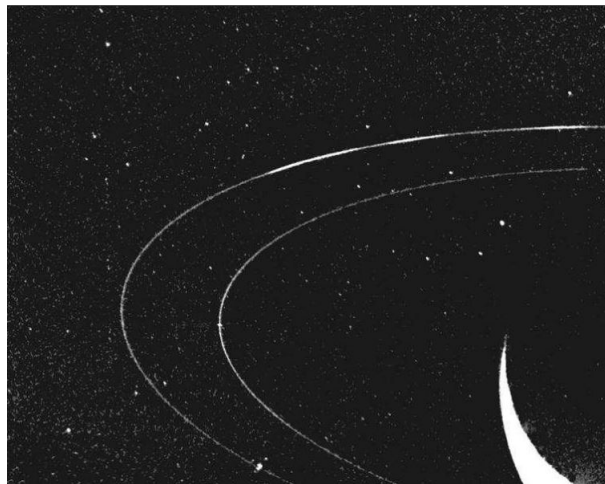


Figura 2.4: Los anillos del planeta Neptuno. NASA/JPL. Imagen tomada por la nave Voyager 2 en agosto de 1989.

La primera detección fiable de uno de estos anillos se obtuvo por medio de una ocultación estelar en 1968 a cargo de un equipo de astrónomos de la Universidad de Villanova, Pennsylvania, Estados Unidos. Intentaban tener una medida más precisa del diámetro del planeta utilizando ocultaciones estelares con una estrella de magnitud 7. Ligeras variaciones en el brillo no se consideraron y tuvieron que pasar trece años para que, a través de otra ocultación, cuyas variaciones si se detectaron, el equipo regresara sobre sus propios pasos a los resultados de 1968. Los primeros resultados indicaban que Neptuno tenía un anillo ecuatorial el cual se podría localizar alrededor de 29 800 km a 36 125 km del centro de Neptuno, (Guinan *et al.*, 1982).

En 1989 la nave *Voyager 2* confirmó su existencia, (Smith *et al.*, 1989).

El sistema de anillos de Neptuno consta de cinco anillos, llamados, desde el más cercano al planeta hacia el exterior: (a) Galle, en honor de Johann Gottfried Galle (1812-1910, Alemania), descubridor de Neptuno a instancias de los cálculos de Urbain Le Verrier (1811-1877, Francia), quien predijo la posición de Neptuno en función de las alteraciones que mostraba la órbita de Urano. (b) Lassell, por William Lassell (1799-1880, Reino Unido). (c) Arago, por Francois Arago (1786-1853, Francia), astrónomo, matemático y físico, y (d) Adams, en honor de John Couch Adams (1819-1892, Reino Unido), quien también predijo la posición de Neptuno independientemente de Le Verrier.

Otros tres satélites más, *Náyade*, *Talasa* y *Despina*, orbitan entre los anillos haciendo la función de satélites pastores.

El material del que están compuestos los anillos es muy oscuro y con una probable presencia de

compuestos orgánicos producidos por la radiación de la magnetósfera del planeta de manera similar a lo encontrado en los anillos de Urano. El polvo en los anillos tiene una concentración entre el 20 % y 70 % con respecto al volumen total, mientras que la profundidad óptica es $< 10^{-2}$ ⁴. Se piensa que los anillos de Neptuno, al igual que los de Urano, son relativamente jóvenes y es probable que su edad sea significativamente menor que la del sistema solar.

2.4. Anillos en cuerpos menores

Los anillos también pueden generarse en torno a cuerpos planetarios menores, por ejemplo, asteroides como (10199) Cariclo. Dicho asteroide fue descubierto el 15 de febrero 1997 por James V. Scutti. Se localiza a 16 UA, entre las órbitas de Saturno y Urano. Se caracteriza por ser el objeto celeste más pequeño (técnicamente un planetóide) con un par de anillos. Pertenece a una clase de objetos llamados *centauros*, los cuales atraviesan el sistema solar exterior en órbitas inestables y comparten características con asteroides y cometas.

Sin embargo, fue el equipo del astrónomo brasileño Felipe Braga-Ribas quien descubrió los anillos de Cariclo mientras calculaba la curva de luz generada por el asteroide al bloquear la luz de la estrella UCAC4 428-10886726, el 3 de junio de 2013, (Braga-Ribas *et al.*, 2014).



Figura 2.5: Anillo alrededor del asteroide Cariclo. Fuente Wikipedia

Los investigadores encontraron una disminución del brillo, como se esperaba, cuando el asteroide atravesó la estrella. Pero también detectaron dos decrementos en el brillo mucho más pequeños antes y después de que Cariclo pasara por delante de la estrella. Al reunir los resultados de los telescopios de siete lugares de América del Sur, el equipo dedujo que las irregularidades se debían a dos anillos

⁴La profundidad óptica τ es una cantidad adimensional que se usa para describir que tan transparente es un medio, esto es, qué tanto penetra un haz de luz en dicho medio.

distintos y estrechos, de 7 y 3 kilómetros de ancho respectivamente. La misma técnica se utilizó para descubrir los anillos alrededor de Urano en 1977.

Se especula que los anillos surgieron como resultado de que un cuerpo pequeño podría haber chocado con Cariclo, enviando restos de ambos cuerpos a un disco. Otras posibilidades son que se formara un disco con el material que se desprendió de Cariclo al girar o que el cuerpo liberara polvo o hielo al activarse debido a la radiación solar.

2.5. Galaxias

Parte de los mecanismos de formación de anillos planetarios y galaxias espirales obedecen a los mismos procesos físicos. Una Galaxia es un conglomerado de estrellas, polvo y gas, que por acción de la fuerza gravitacional interaccionan entre si, orbitando alrededor de un centro. Las galaxias de acuerdo a la distribución de su luz visible se clasifican en galaxias elípticas y galaxias de disco. La primera clasificación de galaxias, ligeramente diferente, la debemos al astrónomo Edwin Hubble (1889-1953, Estados Unidos), (Hubble, 1937).

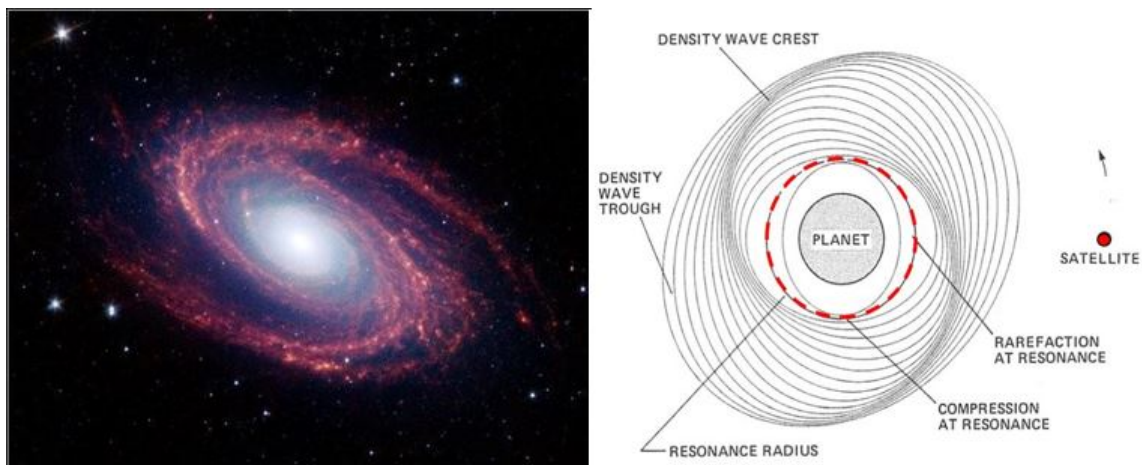


Figura 2.6: Acaso, ¿la formación de anillos planetarios y galaxias espirales obedecen los mismos procesos físicos? Una pregunta que aún aguarda una respuesta.

Los primeros estudios sobre la formación de los brazos espirales corresponden a Bertil Lindblad (1895-1965, Suecia), (Lindblad, 1934). La primera teoría admisible fue ideada por Chia Chiao Lin (1916-2016, China) y Frank Shu (1943-2023, China) en 1964, (Lin y Shu, 1964). Sugirieron que los brazos espirales (regiones brillantes, angostas y curvas) eran manifestaciones de ondas de densidad. Supusieron que las estrellas se desplazan en órbitas ligeramente elípticas y que la orientación de sus órbitas está correlacionada, esto es, las órbitas elípticas varían su orientación unas de otras, ligeramente con el incremento de la distancia al centro galáctico. Estas órbitas están más cercanas en algunas áreas presentando el efecto de parecer brazos. Las estrellas no permanecen siempre en la posición en que las vemos, sino que pasan por los brazos al desplazarse en sus órbitas. Se han propuesto hipótesis alter-

nativas que implican ondas de formación estelar desplazándose por la galaxia; las estrellas brillantes producidas en la formación estelar mueren rápidamente, dejando regiones más oscuras tras la onda y, por tanto, haciendo esta visible.

Capítulo 3

La misión Cassini

Cassini-Huygens fue un proyecto conjunto de la NASA, la Agencia Espacial Europea y la agencia Espacial Italiana. El orbitador Cassini fue construido por la NASA/JPL. La sonda Huygens fue construida por la ESA, mientras que la Agencia Espacial Italiana se encargó de proporcionar la antena de comunicación de alta ganancia de la nave Cassini. El costo total de la misión fue aproximadamente, de 3 200 millones de dólares, de los cuales Estados Unidos aportó 2 600 millones, la Agencia Espacial Europea 500 millones y la Agencia Espacial Italiana 160 millones. Se trató de una misión espacial no tripulada cuyo objetivo fue estudiar el planeta Saturno y sus satélites naturales. El lanzamiento tuvo lugar el 15 de octubre de 1997 de la estación de Cabo Cañaveral por medio de un cohete Titán *IV/B* de dos etapas y entró en órbita alrededor de Saturno el 1 de julio de 2004. El día 25 de diciembre de 2004 la sonda se separó de la nave aproximadamente a las 02 : 00 UTC. La sonda logró posarse sobre la superficie de la mayor luna de Saturno, Titán, el 14 de enero de 2005 para recoger información científica. La nave Cassini es la primera nave que orbita Saturno y el cuarto artefacto espacial humano que lo visita. Los principales objetivos de la misión Cassini-Huygens fueron:

1. Determinar la estructura tridimensional, la composición y el comportamiento dinámico de los anillos de Saturno.
2. Determinar la composición de la superficie de los satélites y la historia geológica de cada objeto.
3. Determinar la naturaleza y el origen del material oscuro de la superficie de Júpiter.
4. Medir la estructura tridimensional y el comportamiento dinámico de la magnetósfera.
5. Estudiar el comportamiento dinámico de la atmósfera de Saturno.
6. Estudiar la variabilidad atmosférica de Titán.
7. Realizar la cartografía detallada de la superficie de Titán.

La nave medía más de 6.8 metros de longitud y más de 4 metros de diámetro. En la parte superior se montó una gran antena parabólica de 4 metros de diámetro. Contó con 1 630 circuitos interconectados, 22 000 conexiones por cable, y más de 14 kilómetros de cableado.

La nave constaba de tres módulos: Un módulo de equipamiento menor, que albergaba los equipos electrónicos, un módulo de propulsión que contuvo los sistemas de propulsión y un módulo de equipamiento inferior que contenía los RTG (*Radioisotope Thermoelectric Generators*) o generadores termoeléctricos de radioisótopos, así como las ruedas de reacción y motores.

En un lado del cilindro se encontraban los instrumentos ópticos, el magnetómetro de 11 m y otros instrumentos.

Diecisiete países participaron en el desarrollo de la nave Cassini, la nave de exploración científica más grande que se haya construido (sólo superadas en peso, por las dos naves del proyecto *Phobos* enviadas a Marte en 1988 por la Unión Soviética). La masa sólo de la nave fue de 2125 kg, pero llevaba 3867 kg de combustible propelente y 687 kg en instrumentos. La electricidad fue provista por tres RTG, cada uno con 10.9 kg de Plutonio-238, que convertían el calor en electricidad. Cada uno generaba 300 Watts de potencia y un voltaje de 30 Volts. Los RTG alimentaron a todos los equipamientos de la nave de manera continua.

Cuando la nave Cassini entró en órbita alrededor de Saturno en 2004, estuvo a una distancia de entre 8.2 y 10.2 UA de la Tierra. Por esta razón, las señales que se recibía o enviaba tardaban entre 68 y 84 minutos en alcanzar su destino. En la práctica, esto significa que los controladores en tierra no operaron en tiempo real, ya sea para operaciones cotidianas o en caso de una avería inesperada.

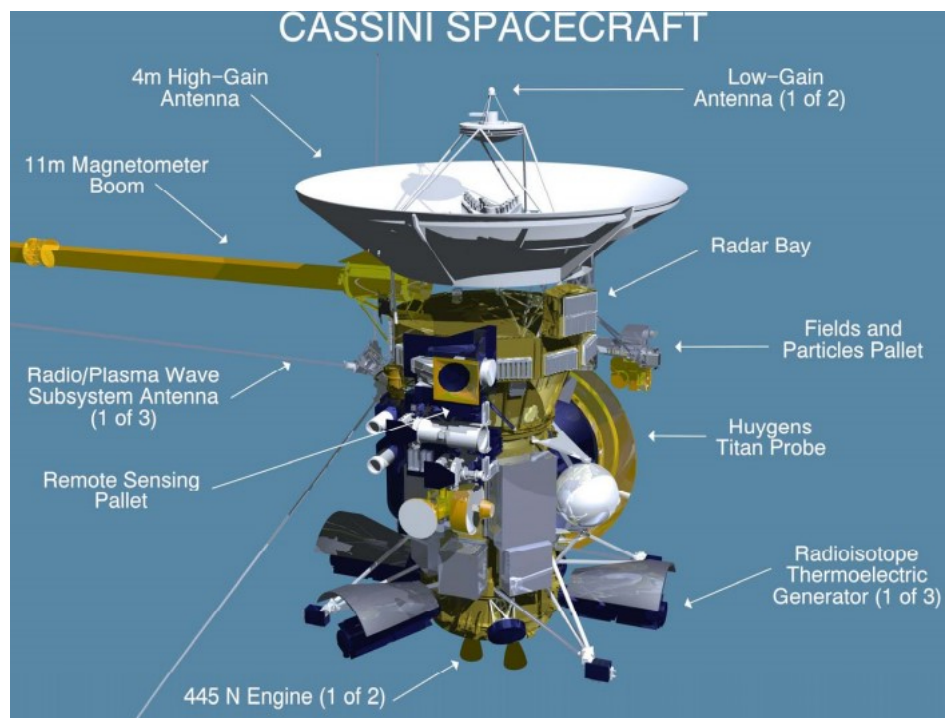


Figura 3.1: Principales componentes de la nave Cassini. Imagen tomada de NASA, JPL.

3.1. Instrumentación

La instrumentación de la nave Cassini consistió en un Radar, una cámara CCD (*Charge Coupled Device*), un espectrómetro de luz visible e infrarroja (VIMS), un espectrómetro compuesto infrarrojo (CIRS), un analizador de polvo cósmico (CDA), un experimento de ondas de radio y plasma, un espectrómetro de plasma, un espectrógrafo ultravioleta (UVIS), un analizador de imágenes magnetosféricas, un magnetómetro, un espectrómetro de masa. A esto hay que añadir una serie de antenas para comunicaciones con la Tierra y otras para realizar mediciones científicas. Por su parte, la sonda Huygens fue concebida para explorar las nubes, la atmósfera y la superficie de Titán, la mayor luna de Saturno, penetrando en la atmósfera de Titán y llevando un laboratorio robotizado a la superficie. Inicialmente, cuando se planeó esta etapa de la misión, se desconocía el tipo de superficie que Titán podía tener. En los meses previos al aterrizaje de la sonda se confiaba en que el análisis de los datos de Cassini ayudaría a responder esta cuestión. La mayor de las incertidumbres iniciales era saber si la sonda se posaría sobre terreno sólido o sobre la superficie de un lago o mar de hidrocarburos.

3.2. Instrumentos relevantes para el estudio de los anillos principales

Ya que el interés de esta tesis se centra en el estudio de los anillos principales de Saturno, enfocamos esta sección en los cuatro instrumentos más relevantes para su estudio: los espectrómetros de estudio en el infrarrojo (CIRS), en el ultravioleta (UVIS) y en el visible (VIMS) y el analizador de polvo (CDA).

Nuestro interés se concentrará en el instrumento CIRS que observa en la ventana natural de radiación de los anillos: el infrarrojo. La radiación infrarroja tiene una longitud de onda entre 10^{-3} m y 7.8×10^{-7} m. La frecuencia está en el intervalo de 3×10^{11} y 3.84×10^{14} Hz.

3.2.1. Espectrómetro Compuesto Infrarrojo, CIRS

El instrumento CIRS (el acrónimo de *Cassini Composite Infrared Spectrometer*) o Espectrómetro Infrarrojo Compuesto de Cassini, capta la radiación electromagnética en la banda del infrarrojo y su interpretación está en función de la temperatura de las partículas. Es ideal para estimar la composición de estas.

Un espectrómetro es un dispositivo que mide y analiza el espectro que emite una fuente o que es absorbida por una sustancia que se encuentra en el camino de la luz que emite una fuente.

El instrumento CIRS es un arreglo de dos interferómetros de Fourier (medio y lejano) que, en conjunto, cubren un intervalo de longitudes de onda de $7\mu\text{m}$ a 1mm .

El interferómetro en el infrarrojo lejano cubre números de onda en el intervalo $10\text{cm}^{-1} < k < 600\text{cm}^{-1}$ al cual le corresponde una longitud de onda de $1000\mu\text{m} - 16.66\mu\text{m}$, respectivamente. El interferóme-

tro en el infrarrojo medio le corresponden números de onda en el intervalo $600\text{cm}^{-1} < \kappa < 1400\text{cm}^{-1}$ y longitudes de onda de $16.66\ \mu\text{m} - 7.14\ \mu\text{m}$, respectivamente.¹

El interferómetro infrarrojo lejano consiste de un interferómetro de polarización de plano focal único (Focal Plane 1, FP1) de cuyos datos se obtiene el pico de la función de Planck de donde se derivan las temperaturas de los anillo asumiendo que las partículas se comportan como cuerpos negros. El interferómetro en el infrarrojo medio es un interferómetro de Michelson convencional con dos conjuntos de planos focales (FP3, FP4) cada uno con 10 detectores de HgCdTe, con un campo de visión (*Field of View* FOV) de 0.273 miliradianes por píxel, (Flasar *et al.*, 2004).

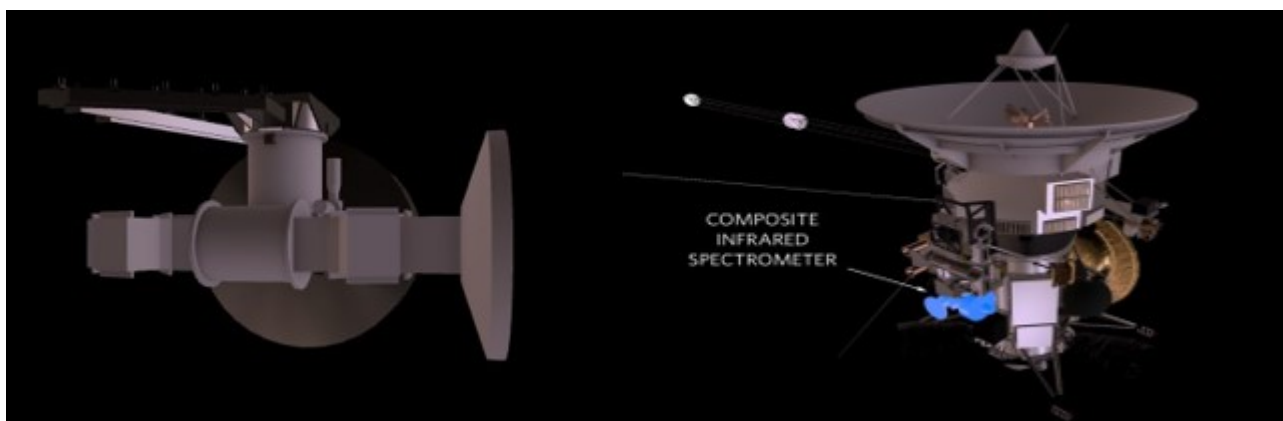


Figura 3.2: El espectrómetro CIRS y su ubicación en la nave Cassini. Imagen tomada de página de la NASA.

Las temperaturas obtenidas por observaciones de CIRS son en realidad temperaturas de brillo, pero suponiendo que las partículas de los anillos se comportan como cuerpos negros, estas se pueden aproximar a las temperaturas físicas.

Al estudiar las temperaturas, así como la composición de los elementos del sistema de Saturno, se pueden estudiar las propiedades de las lunas de Saturno y pueden aprender sobre cómo las estaciones afectan a la atmósfera y los anillos de Saturno.

Los principales objetivos de CIRS fueron el estudio de los anillos, la composición de la atmósfera a varias altitudes y analizar varias moléculas, sin embargo, en esta tesis sólo nos interesa el destinado a los anillos: determinar la estructura térmica, así como la composición química y las dimensiones de las partículas.

Entre los conjuntos de datos utilizados en esta tesis, están datos del lado iluminado y no iluminado por el Sol de los anillos, tomados de Flandes *et al.* (2010). Dichos datos fueron obtenidos por el instrumento CIRS entre los años 2004 y 2009. Estos datos cubren un rango de elevación solar que comprende $B' = -22^\circ$ a $B' = 0^\circ$ y en este período de tiempo el Sol iluminó el lado sur de todos los anillos principales. Los datos corresponden a una distancia media desde la nave, de veinte radios de Saturno y un campo de visión (FOV, *Field of View*) cercano a los 5 000 km.

Las mediciones del tiempo local (o ángulo azimutal con respecto a Saturno) están en el intervalo

¹El número de onda se calcula $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$, para el instrumento CIRS, se calcula como $\kappa = \frac{1}{\lambda}$.

$4.7h \leq \psi \leq 20.0h$ (donde el mediodía o la dirección Saturno-Sol, corresponde a $\psi = 12h$). El ángulo de fase α está en el intervalo $0.0^\circ < \alpha \leq 70.9^\circ$, excepto un escaneo para el cual $\alpha = 144^\circ$ y el ángulo de elevación de la nave B está en el intervalo $-34.0^\circ < B \leq -2.6^\circ$. El análisis de los datos de los anillos obtenidos por el instrumento CIRS se apoya en otros tres instrumentos, que se presentan a continuación.

3.2.2. Espectrómetro UVIS

El espectrógrafo de imágenes ultravioleta creó imágenes mediante la observación de la luz ultravioleta. En estas longitudes de onda, los gases que el ojo humano no puede ver se vuelven visibles. El espectrógrafo podía determinar de qué están hechos esos gases dividiendo la luz en las longitudes de onda que la componen, o colores, de forma parecida a un arco iris.

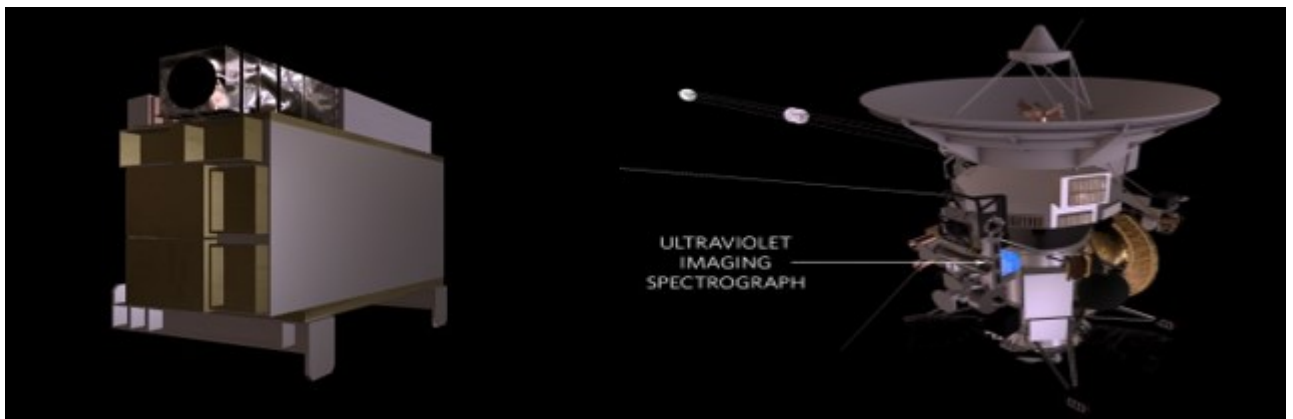


Figura 3.3: El espectrómetro UVIS y su ubicación en la nave Cassini. Imagen tomada de página de la NASA.

El espectrómetro UVIS es un conjunto de detectores diseñados para medir la luz ultravioleta en el rango de 55.8 a 190 nm, reflejada o emitida por las atmósferas, los anillos y las superficies para determinar sus composiciones, distribuciones, contenidos de aerosoles y temperaturas. UVIS midió las fluctuaciones de la luz estelar y solar a medida que el Sol y las estrellas se mueven detrás de los anillos y las atmósferas de Titán y Saturno, y determinó las concentraciones atmosféricas de hidrógeno y deuterio. Estos datos se utilizaron para estudiar las atmósferas, la magnetósfera y los anillos del sistema de Saturno.

3.2.3. Espectrómetro VIMS

El Espectrómetro de Mapeo Visible e Infrarrojo (VIMS) detectó la radiación electromagnética en los intervalos de longitud de onda correspondiente al visible y al cercano infrarrojo. Separó la luz en sus distintas longitudes de onda, con lo cual se pudo conocer la composición de los materiales desde los que se reflejaba o emitía la luz.

El VIMS se utilizó para determinar el contenido y las temperaturas de las atmósferas, los anillos y las superficies del sistema de Saturno. El instrumento analizó la luz, pero los científicos también crearon imágenes a partir de sus datos, de forma similar a una cámara de luz visible.

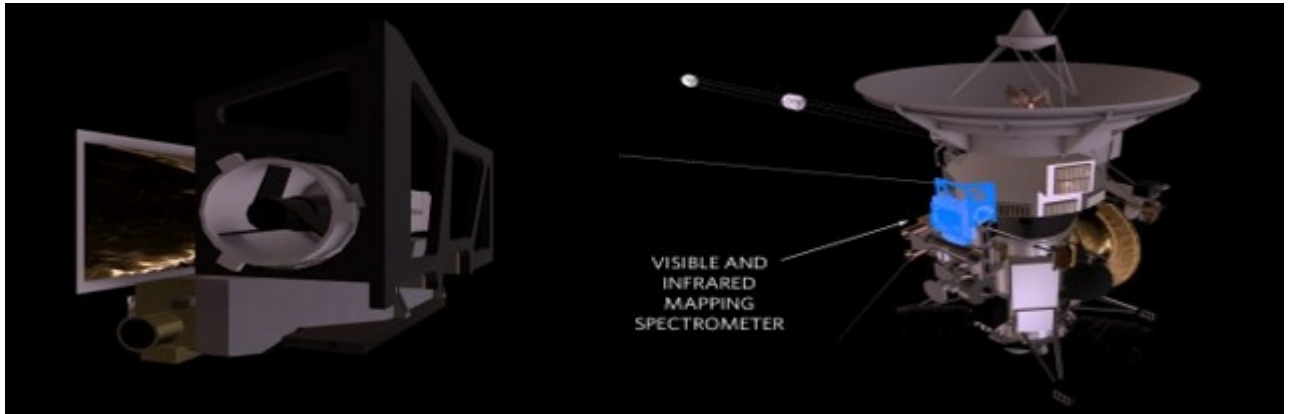


Figura 3.4: El espectrómetro VIMS y su ubicación en la nave Cassini. Imagen tomada de página de la NASA.

El VIMS tenía dos cámaras en un solo instrumento: una midió las longitudes de onda visibles y la otra las infrarrojas, y ayudaron a los científicos a estudiar la composición del anillo y las lunas de Saturno, y las atmósferas de Saturno y Titán, entre otras cosas. En el caso de atmósferas como las de Saturno y Titán, en ocasiones se pudo determinar las altitudes y espesores de las nubes y brumas, y también se pudo cartografiar el brillo de las emisiones aurales en las regiones polares de Saturno.

Cuadro 3.1: Características del instrumento VIMS (Tomado de Brown *et al.* (2004))

	VIMS-VIS	VIMS-IR
Rango espectral (μm)	0.35 - 1.0	0.85 - 5.1
Número de bandas	96	256
Muestreo espectral (nm) R_S	7.3	16.6
Campo de visión (mrad)	0.17 x 0.17	0.25 x 0.5

3.2.4. Analizador de polvo cósmico, CDA

El Analizador de Polvo Cósmico, o CDA, detectaba partículas de polvo micrométrico y submicrométrico. Cuando una partícula de polvo entraba en el CDA, el instrumento podía estimar su carga,

velocidad, tamaño y dirección a partir de la generación de una nube de plasma del material vaporizado del detector y de la propia partícula producto del choque de hipervelocidad ($\approx 10\text{ km/s}$),².

La nube de plasma era sometida a una diferencia de potencial y las corrientes derivadas de la separación de iones y electrones fue analizada. El polvo se movía en una dirección distinta a la de los granos helados que suelen encontrarse alrededor de Saturno, y viajaban a más de 72 000 kilómetros por hora (45 000 millas por hora), lo suficientemente rápido como para que la gravedad de nuestro sistema solar no pudiera capturarlos. De no haber sido por el CDA, los trenes de polvo habrían atravesado el sistema solar y regresado al espacio interestelar.

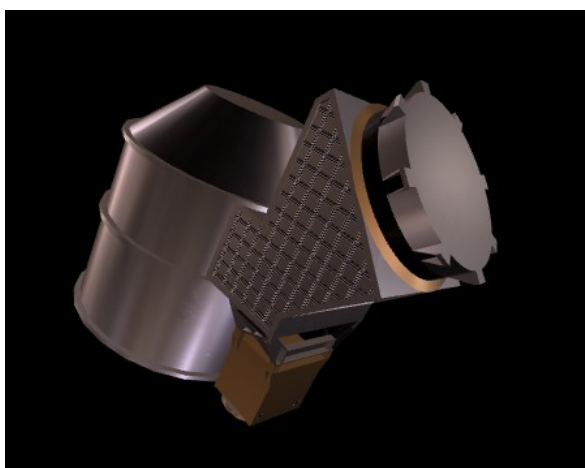


Figura 3.5: El analizador de polvo cósmico de la nave Cassini. Imagen tomada de página de la NASA.

El CDA contó con dos tipos de sensores. Los detectores de alta velocidad se incluyeron principalmente para estudiar los anillos de Saturno y para contar el número de partículas que el instrumento podía encontrar, hasta 10 000 por segundo. El otro tipo de sensor era el analizador de polvo (el gran cubo). Era capaz de detectar sólo una partícula por segundo, pero también determinaba la carga, la velocidad, la dirección de vuelo, la masa y la composición química de la partícula.

Las partículas de polvo están presentes en todo el sistema de Saturno, pero se concentran preferentemente cerca del plano ecuatorial. Parte del polvo procede de fuera del sistema de Saturno, incluso de más allá de nuestro sistema solar. Otras partículas se desprenden de las superficies de los anillos y lunas de Saturno, y del penacho de material en erupción de la luna Encélado. Al estudiar estas partículas con el CDA, se comprendió mejor qué las producía y cómo interactuaban con los anillos, las lunas y la magnetosfera de Saturno.

Se encontró que la composición de las partículas de polvo de Saturno varía según su origen y otros factores. El polvo puede ser expulsado de una luna golpeada por un meteoróide, o a través de erupciones de potentes géiseres. Todas las partículas tenían una composición química similar: magnesio, silicio, hierro y calcio. El CDA ayudó a comprender las relaciones entre los cuerpos grandes y pequeños, averiguando qué tipo de material procede de cada lugar.

²El término *hipervelocidad* se utiliza para describir una velocidad muy alta principalmente en astrofísica, generalmente definida con una tasa superior a 3 km/s.

Capítulo 4

Aspectos generales de los anillos de Saturno

La mayor parte de la masa del sistema de anillos de Saturno se concentra en los anillos A, B, y C, así como la División de Cassini, es decir, los anillos principales. De los anillos principales, el anillo A es el más externo y el C el más cercano al planeta. La transparencia de cada uno de estos anillos depende de sus constituyentes.

En el caso de los anillos principales, existe consenso en que son un disco con una extensión vertical de pocos metros, compuestos de partículas que chocan entre sí y cubiertas con regolito de hielo de agua, todas las aproximaciones para describirlos dependen fuertemente de una estructura fina.

Los tamaños de las partículas de los anillos abarcan desde granos de polvo hasta algunos metros sin contar a las lunas que tienen sus órbitas dentro de los anillos. La forma más natural de describir esta amplia distribución es con una ley de potencias, es decir, el número de partículas por unidad de volumen en un pequeño intervalo da , centrado sobre un tamaño a :

$$N(a)da = C_0 a^{-q} da, \quad a_{min} < a < a_{max}, \quad (4.1)$$

Donde C_0 es una constante relacionada con la opacidad total.

a_{min} y a_{max} son las partículas más grandes y más pequeñas en la distribución.

Se puede afirmar que el tamaño de las partículas sigue, en primera aproximación, una ley de potencia inversa trunca de índice q , el cual se puede determinar por medio de la profundidad óptica.

Con las observaciones en Tierra se estima que el valor de q es de 2.75, (French y Nicholson, 2000), para el interior del anillo A, el cual se extiende de los 122 053 a 133 423 km con respecto al centro de Saturno; de igual forma para todo el anillo B y la división de Cassini. Para el exterior del anillo A desde 133 745 a 136 774 km el valor de q es de $q = 2.90$, finalmente $q = 3.1$ para todo el anillo C. En promedio, el valor de q es aproximadamente 3.

También se estima que el tamaño mínimo de las partículas a_{min} tiene valores de 1 cm para el anillo C y para el exterior del anillo A, en tanto que el tamaño máximo a_{max} , es de 20 m para todos los anillos principales, excepto C, donde $a_{max} = 10$ m. Con las mediciones de radio ocultación hechas por la nave

Voyager (RSS) (Zebker *et al.*, 1985), se estima un índice para la ley de potencias de 3.05 – 3.11 para el anillo C, de 2.79 para el exterior de la división de Cassini y en promedio de 2.78 – 3.03 para el interior y exterior, respectivamente del anillo A. Para todos los anillos $a_{min} = 0.1$ cm, mientras que a_{max} es del orden de pocos metros y arriba de 11.2 m en el caso del borde exterior del interior del anillo A. Un estudio mucho más refinado del tamaño de las partículas se puede encontrar en (Jerousek *et al.*, 2016) y (Colwell *et al.*, 2018), ambos basados en el trabajo de (Colwell *et al.*, 2007), que combina datos del UVIS y del VIMS. A primera aproximación, los estudios hechos entre ellos son consistentes, tal que, si combinamos las radiocultaciones de las naves *Voyager* y *Cassini*, así como las observaciones hechas en Tierra se asume que $q \approx 3$ lo cual arroja que $1 < a_{min} < 30$ cm y que $2 < a_{max} < 20$ m, (Cuzzi *et al.*, 2009), para todos los anillos principales.

En contraste con los anillos principales, que son el objeto de estudio de esta tesis, los demás anillos de Saturno se componen esencialmente por partículas de polvo de diversos tamaños, pero en promedio micrométricas.

Describimos a continuación los componentes del sistema de anillos. En particular, en el caso de los anillos principales, abundaremos en su estructura a través de las observaciones térmicas en los capítulos posteriores. En la información que damos a continuación no se incluyen las estructuras semianulares o arcos (como los de Palene y Antea), ni tampoco un anillo parcialmente identificado como el anillo de Rea. Adicionalmente, resaltamos algunos aspectos dinámicos que definen la estructura de los anillos.

4.1. Componentes principales del sistema de anillos

Cuadro 4.1: Tabla comparativa de los anillos principales de Saturno A, B, C y División de Cassini.

Anillo	C	B	División Cassini	A
Extensión radial R_S	1.24 – 1.53	1.53 – 1.95	1.95 – 2.03	2.03 – 2.27
Largo (km)	17500	25400	4500	14610
Borde interno (km)	74500	92000	117500	122200
Masa global (g)	1.1×10^{21}	2.8×10^{22}	5.7×10^{17}	6.2×10^{21}
Profundidad óptica τ	0.05 – 0.2	1 – 4.8	0.1 – 0.15	0.4 – 1

1. Anillo A: es un anillo muy dinámico donde constantemente las rocas se aglomeran debido a la propia gravedad, formando cúmulos en forma de barras que las fuerzas de marea estiran y

rompen continuamente. Se ubica entre los 122 170 km y los 136 775 km. Su anchura radial es de 14 605 km; su grosor vertical está en el intervalo de los 10 a los 30 metros.

2. División de Cassini: antes considerada una brecha o separación entre los anillos A y B. Hoy se sabe que es un anillo en sí mismo, tan tenue como el anillo C.
3. Anillo B: es un anillo ancho y denso, en el que las rocas que lo forman se encuentran tan cercanas una de otras que no permiten el paso de la luz a través de él. Un rasgo particular del anillo B se observa en su parte central y ópticamente más gruesa donde se observan unas perturbaciones orientadas radialmente, en forma de cuña.

Se deduce que las cuñas son concentraciones locales y transitorias de partículas de polvo anillo, de un micrómetro de tamaño.

El anillo B se ubica entre los 92 000 y los 117 580 kilómetros; su anchura radial es de 25 580 kilómetros; su grosor vertical está en el intervalo de los 5 a los 15 metros.

4. Anillo C: es un anillo muy tenue u ópticamente delgado, tal que, se puede ver a través de él. Las rocas que lo forman tienen escaso contacto entre sí. Se ubica entre los 74 658 y los 92 000 kilómetros. Su anchura radial es de 17 342 kilómetros y su grosor vertical es aproximadamente de 5 metros.
5. Anillo D: es el anillo más interior del sistema y muy tenue, pero que se compone de polvo y rocas comparables con las de los otros anillos principales cuya frontera interior es difícil distinguir de la parte interna del anillo C.
6. Anillo F: es un anillo muy delgado esta formado tanto de rocas como de polvo. Probablemente es uno de los anillos más dinámicos, ya que su estructura puede cambiar en cuestión de horas por la influencia de sus lunas pastoras, Prometeo y Pandora, dos lunas de alrededor de 43.1 y 40.7 km de radio, respectivamente. Su distancia radial con respecto a Saturno es de alrededor de 140 180 kilómetros y su anchura radial varía de los 30 a los 500 kilómetros.
7. Anillo E: es un disco difuso de polvo de hielo de agua con cantidades pequeñas de silicatos y otros compuestos de CO_2 y NH_3 . Su parte más interna es alimentada por el polvo de los géiseres de la luna Encelado, pero todo el anillo contiene polvo que proviene de los impactos de meteoroides, principalmente en la superficie de la luna Rea. Se ubica entre los 180 000 y los 480 000 kilómetros del centro de Saturno. Su anchura radial está entre alrededor de los 3.9 y más de 8 radios de Saturno.
8. Anillo G: es un anillo tenue constituido de polvo y ubicado entre los anillos F y E. En su frontera interior, tiene un arco de rocas, de uno o varios metros, centrado en la luna Egeón. El polvo de este anillo se debe a impactos de meteoroides en Egeón y en las rocas que componen su arco. Se ubica entre los 166 000 y los 175 000 kilómetros.
9. Anillo de Febe: este anillo está hecho en su totalidad de polvo de impactos de meteoroides en la luna Febe. Es el anillo más externo de Saturno, también se le conoce como el superanillo por

su gran extensión radial, pues se ubica aproximadamente entre los 4 000 000 y los 13 000 000 kilómetros.

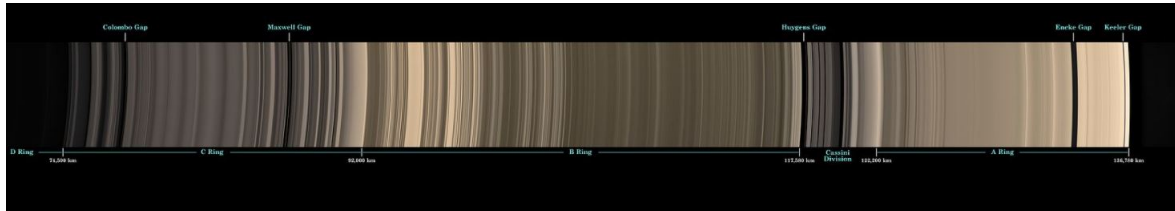


Figura 4.1: Este mosaico natural fue logrado por la nave espacial Cassini mientras se elevaba 39° del lado no iluminado de los anillos de Saturno. NASA/JPL/Space Science Institute.

Cuadro 4.2: Tabla comparativa de los anillos de Saturno D, E, F y G.

Anillo	D	F	G	E
Extensión radial R_S	1.09 – 1.24	2.32	2.75 – 2.87	3 – 87
Largo (km)	7500	400	8000	300000
Borde interno (km)	68000	140210	165800	180000
Masa global (g)	–	–	1×10^{17}	7×10^{18}
Profundidad óptica τ	$\times 10^{-5} - \times 10^{-4}$	1	$\times 10^{-5} - \times 10^{-4}$	$\times 10^{-7} - \times 10^{-6}$

4.2. Aspectos dinámicos generales de los anillos principales

Aparte de la influencia gravitacional que ejerce Saturno en los anillos, estos están sometidos a la fuerza gravitacional de las lunas vecinas (grandes y pequeñas) que orbitan al planeta. Los efectos combinados del conjunto generan fenómenos que contribuyen a la micro y macro estructura de los anillos. A continuación, se describen algunos de estos aspectos y fenómenos:

4.2.1. Cuñas radiales (*Spokes*)

Son esencialmente nubes de polvo micrométrico, (Doyle y Grun, 1990), cargado electrostáticamente que se levantan o levitan por repulsión electrostática de las superficies de las partículas que componen los anillos, en particular del anillo B. Las partículas muy probablemente son producto de los impactos de micrometeoroides en las superficies de las partículas de los anillos, pero el mecanismo de levitación y formación preciso es desconocido hasta ahora, pero se pueden deber a perturbaciones eléctricas en la magnetósfera interna de Saturno o a la radiación ultravioleta solar, o una combinación de ambas.

Las nubes de polvo se orientan radialmente y se dispersan a lo largo de los anillos debido a la rotación de los mismos, (Yaroshenko *et al.*, 2009), (Porco, 1983). La forma de la cuña se debe a la velocidad rotacional diferencial, la región del anillo más cercana al planeta rota más rápido y este fenómeno también se cumple para las partículas de la cuña. Su existencia temporal es menor en relación con el período orbital de Saturno, aproximadamente 10 h. Se cree que el campo magnético de Saturno es responsable en alguna medida de la levitación de las pequeñas partículas que forman una cuña.

4.2.2. Ondas de densidad (*Density Waves and bending waves*)

En particular, en el caso del anillo A, uno de los rasgos que saltan a la vista son una serie de ondas de densidad producto de resonancias de Lindblad (7:6)¹ con las lunas vecinas, principalmente Prometeo y Pandora, pero también por las lunas Pan y Dafne que están embebidas en el anillo A y han abierto dos brechas en él (de Encke y Keeler, respectivamente). En general, las ondas de densidad son ondas compresivas que se propagan radialmente y se originan en las zonas donde la frecuencia radial de las partículas está en resonancia con la luna. En contraste, otro efecto de las resonancia son las llamadas *bending waves* u *ondas de flexión* que se producen en las zonas donde la frecuencia vertical de las partículas está en resonancia con la luna que produce la perturbación. Ya que la fase de la onda depende de la longitud dentro del anillo, estas ondas se propagan en forma espiral (Colwell *et al.*, 2008). Muy probablemente este mismo mecanismo es el que produce los brazos espirales en una galaxia (Goldreich y Tremaine, 1978, 1980).

¹Una resonancia de Lindblad es un tipo de resonancia orbital en que la frecuencia epicíclica de un objeto es un múltiplo simple de alguna frecuencia forzada.

4.2.3. Estelas o barras autogravitantes (*Self-Gravity wakes*)

De las ocultaciones estelares obtenidas en alta resolución por el interferómetro UVIS, los perfiles de la profundidad óptica normal aparente de los anillos principales, mostraron datos con grandes variaciones a lo largo de los anillos A y B, lo cual sugiere que están compuestos de regiones grumosas en forma de largas barras opacas, separadas por regiones transparentes, denominadas *wakes* o estelas, que se producen como resultado de la competencia de acreción gravitacional de las partículas del anillo y el barrido kepleriano. En ocasiones se denominan estelas gravitacionales o estelas *Julian-Toomroe*, por su parecido a las estelas producidas por un cuerpo muy masivo en una galaxia (Colombo *et al.*, 1976, Julian y Toomre, 1966), estas características son aglomerados arrancados de las partículas del anillo que se forman debido a la mutua atracción gravitacional entre las partículas del anillo.

Los anillos A y B muestran una estructura donde las estelas son evidentes. Sí se comparan con los del anillo A, las *wakes* del anillo B son más planas y más densamente empaquetadas, de tal forma que la razón entre el grueso del *wake* vertical o altura H , con respecto al ancho del *wake* W , resulta $H/W < 0.1$.

Las *wakes* en el anillo B, parece que llegan a ser incluso planas y empaquetadas, mientras que su separación S , disminuye con la profundidad óptica, (Colwell *et al.*, 2007), como muestran las ocultaciones de UVIS y VIMS, (Jerousek *et al.*, 2016).

Se estima que tanto las razones entre su extensión vertical y ancho, H/W , y entre las separación entre barras contiguas y el ancho de las mismas, S/W , están en el rango de $0.05 - 0.35$ y $0.5 - 3.0$ respectivamente, para el anillo A; para el anillo B las mismas razones están aproximadamente en los rangos $0.01 - 0.2$ y $0.01 - 3.0$. Por ser estas barras uno de los rasgos más relevantes en los anillos A y B, abundamos un poco más en estas estructuras en el Capítulo 5.

4.2.4. Propelas (*Propellers*)

En contraste con las brechas a lo largo de los anillos, las resonancias en combinación con efectos viscosos en los anillos también pueden producir vórtices o huecos anulares llamados *propellers*. Las primeras observaciones de las hélices o propellers, fueron reportadas entre 2006 y 2009 por Burns *et al.* (2009), Tiscareno *et al.* (2007, 2008, 2006) en imágenes de alta resolución en el anillo A captadas por la nave Cassini. Se trata de perturbaciones producto de los efectos gravitacionales de pequeñas lunas (designadas *moonlets*) ≈ 40 a 120 metros, cuyas órbitas están incrustadas en los anillos principales. En general, sí un cuerpo de pocos cientos de metros de diámetro está inmerso en un anillo, la brecha que induce en dicho anillo genera una dispersión gravitacional y una difusión de la viscosidad. El balance entre estos dos fenómenos crea una estructura típicamente en forma de S (ese), que se ha designado *propeller* o hélice.

Un *propeller* se puede formar en los anillos si las excentricidades forzadas por la gravedad de las lunas son mucho más grandes que aquellas generadas por la velocidad de dispersión cuasi-estable establecida por el balance entre calentamiento debido a la viscosidad y la disipación de energía a través de las colisiones.

Los *propellers* están en espacios vacíos que se forman aproximadamente a una distancia radial de $\pm 1.5 R_{Hill}$, desde la lunita.²

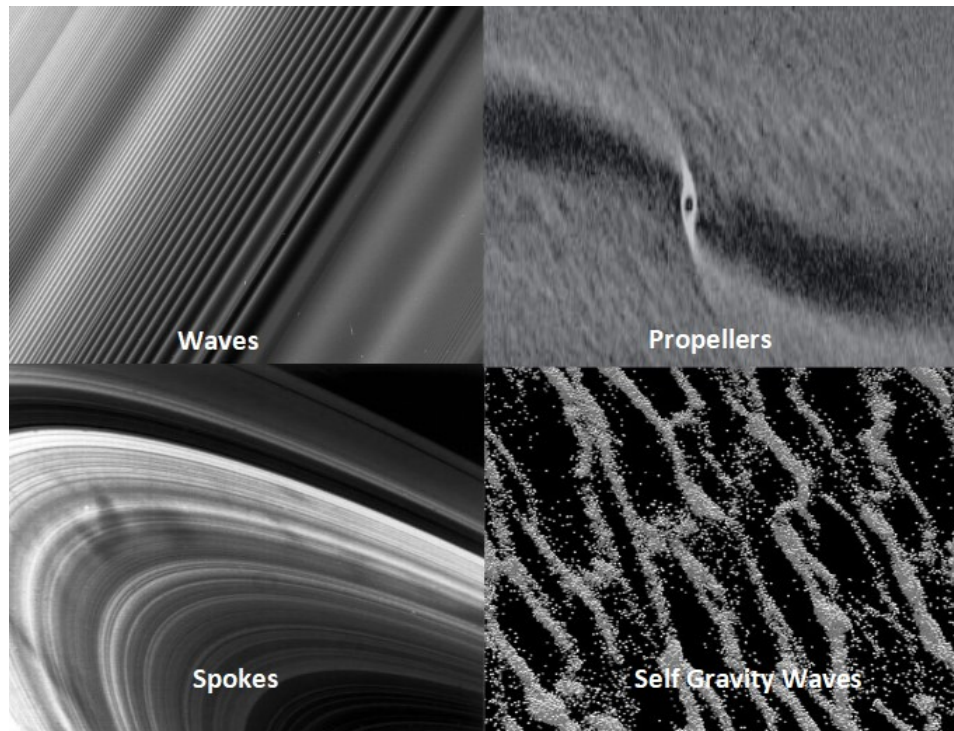


Figura 4.2: Estructuras de los anillos de Saturno (*Waves*, *Propellers*, *Spokes*), naves *Voyager* y *Cassini*: NASA/JPL, Caltech/Space Science Institute. Simulación de n-cuerpos (*Self Gravity Waves*) Michikoshi *et al.* (2015) National Astronomical Observatory of Japan.

$$R_{Hill} = r_0 \left[\frac{M_{Moonlet}}{3M_{Saturn}} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (4.2)$$

Donde:

r_0 : es el radio de la órbita de la *lunita*,

$M_{Moonlet}$: masa de la lunita,

M_{Saturn} : masa de Saturno.

Así, se cumple:

1. Si $R_{Hill} < R_{crit}$, la brecha permanece incompleta.

²La esfera de Hill, es la zona alrededor de un objeto, en el que su gravedad domina. Por ejemplo, la Tierra tiene un radio de Hill de 1.5 millones de kilómetros, un objeto más allá de esta distancia orbitará alrededor del Sol.

La zona de influencia gravitacional de un cuerpo de masa m , tiene dos límites: i) la esfera de Hill y ii) el límite de Roche (véase la sección 2.3), por debajo de él un satélite que orbite alrededor de un cuerpo mucho más masivo terminará siendo destruido por la influencia gravitacional de su anfitrión.

2. Si $R_{Hill} > R_{crit}$, la brecha es completa

Donde el radio crítico se define como:

$$R_{crit} = L(t_{syn}(R_{Hill})), \quad (4.3)$$

L es distancia y t_{syn} es período sinódico.³

La extensión radial y azimutal en un hueco en el *propeller*, se puede predecir a partir de la masa de la lunita y la viscosidad del anillo. Esto último se ha confirmado con simulaciones de n-cuerpos, Seiß *et al.* (2005), usando partículas de tamaño único no autogravitantes.

Analizando doce características de los *propellers*, Sremčević *et al.* (2007), encontraron una cercana dependencia lineal y no la esperada relación cúbica, ver Ecuación 4.1 y sus valores para cada anillo.

$$\varphi_E \propto R_{Moonlet}^\alpha \text{ con } \alpha = 1.1$$

(Tiscareno *et al.*, 2008) encontraron una gran dispersión en las dimensiones de los *propellers* examinados (poco menos de 100), argumentando que la escala cúbica no se debe descartar y mostraron que una escala casi lineal puede ser entendida si las características brillantes del *propeller* en las imágenes se asocian con los levantamientos inducidos por las lunas y no por las brechas. Para lunas de 100 m, estos levantamientos no son muy pronunciados y son probablemente perturbados por el patrón de los levantamientos autogravitacionales en los anillos.

Un gran número de *propellers* también se han encontrado al interior del hueco de Encke. (Tiscareno *et al.*, 2006) presentan una relación:

$$n(R)dR \propto R^{-q}$$

a la cual el propio Tiscareno le asignó valores de $q \approx 5$, y $q \approx 6$. Sin considerar a Pan y a Dafne en la población de *lunitas-propellers*, se sugieren tres familias para el tamaño de las partículas en el anillo:

- a) $1\text{ cm} < R < 10\text{ m}$
- b) $10\text{ m} < R < 500\text{ m}$
- c) $500\text{ m} < R < 10\text{ km}$

En general los *propellers* aparecen en un cinturón de aproximadamente 1 000 km de ancho en tres bandas a la mitad del anillo A. Lo cual sugiere que el cinturón es una región joven del anillo formada después de una colisión catastrófica.

³En general cualquier movimiento en el Sistema Solar con referencia a nuestro planeta se denomina sinódico. Cualquier movimiento con referencia a las estrellas se denomina sidéreo.

4.3. Los anillos de Saturno en comparación con los demás sistemas de anillos

Aunque los planetas gigantes comparten ciertas características entre sí, los anillos de cada planeta tienen características particulares. Los anillos de Júpiter son, en general, ópticamente delgados y compuestos de partículas básicamente micrométricas de polvo. En contraste, Saturno tiene una gran diversidad de anillos, que incluyen anillos de polvo y de rocas con diversas profundidades ópticas. Urano, por su parte, presenta anillos angostos y oscuros, compuestos de polvo e invisibles desde la Tierra. Los anillos de Neptuno son arcos de circunferencia limitados por los efectos gravitacionales y resonancias generadas por sus lunas, Igualmente, son invisibles desde la Tierra. Todos los anillos están dentro del límite de Roche, donde las fuerzas de marea evitan que se formen cuerpos mayores a algunos metros de diámetro. Un rasgo adicional es que también están dentro de la magnetósfera del planeta y en el caso de Urano los anillos están dentro de la atmósfera del planeta. La extensión radial de los anillos de Júpiter, Urano y Neptuno es comparable entre sí. En el caso de los anillos de Saturno, la extensión relativa de los anillos principales podrían compararse con los anillos de los demás planetas cercana a los tres radios planetarios, pero el sistema completo de los anillos de Saturno tiene una extensión mucho mayor alcanzando más allá de los diez radios planetarios.

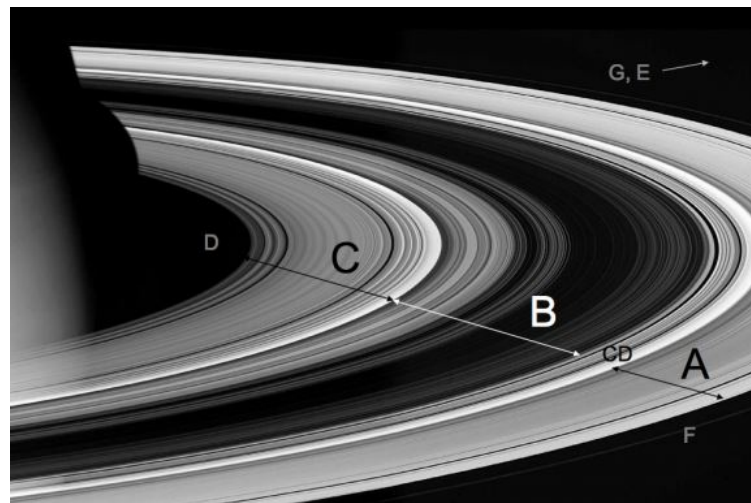


Figura 4.3: Los anillos principales de Saturno. NASA/JPL/Space Science Institute.

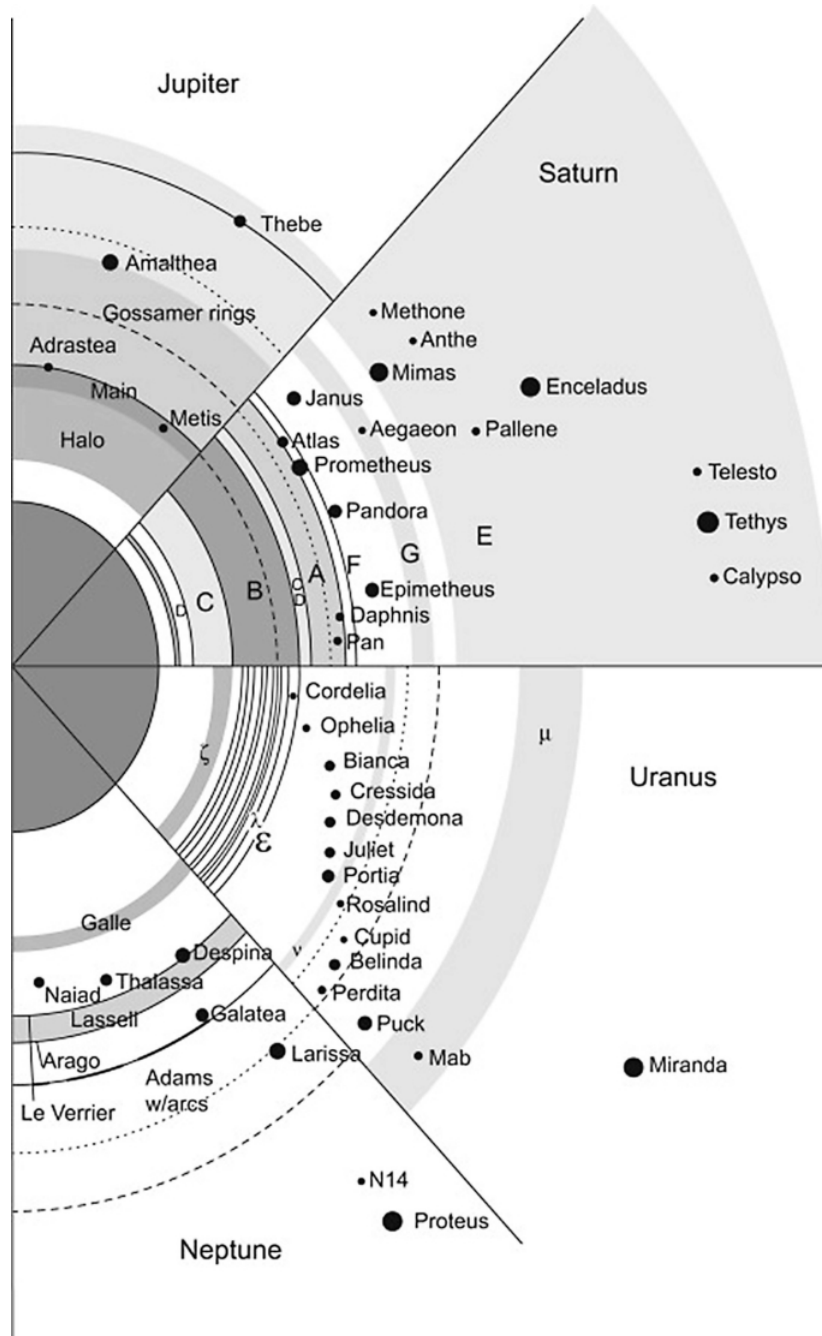


Figura 4.4: Comparación de los anillos de los cuatro planetas gigantes y sus satélites cercanos, Grün *et al.* (2001).

Capítulo 5

Antecedentes de los estudios térmicos de los anillos principales de Saturno

La temperatura de los anillos principales se encuentra entre los 40 y 110 K, lo cual ubica su emisión en el rango térmico infrarrojo, esto es, desde las micras hasta las fracciones de milímetro en longitud de onda (λ). Su emisión depende de cuanta energía absorben, reflejan y dispersan, asimismo, de las propiedades de las partículas que los componen, por ejemplo, su albedo de Bond (A_v), su emisividad (ϵ), su inercia térmica (Γ), su velocidad de rotación (f) y su porosidad (P). La energía que cada partícula absorbe depende de cuanta energía llega a su superficie (por ejemplo, proveniente del Sol). Cómo se distribuye esta energía en los anillos, depende de la profundidad óptica local en los anillos, pues la cantidad de partículas en una región dada, define si entre ellas se bloquean la radiación, es decir, define los eclipses mutuos entre partículas vecinas, por lo cual, en general, todos los efectos de sombreado sobre el anillo son determinantes.

Desde la primera detección de emisión térmica de los anillos de Saturno con longitud de onda de $10\mu m$ en 1969 (Allen y Murdock, 1971), numerosas observaciones se han hecho, y con ellas, se han dado significativos pasos en el entendimiento de las propiedades dinámicas de los anillos.

Las mediciones de radiación térmica de los anillos de Saturno desde naves espaciales se remontan a la sonda *Pioneer 11* en 1979, las naves *Voyager 1* y *2* en 1980 y 1981 respectivamente, y la nave Cassini del 2004 al 2017. Antes de las naves se desarrollaron un limitado número de modelos de las propiedades térmicas de los anillos con datos terrestres. La mayoría de estos modelos pretendían reproducir la temperatura de brillo, T_b , de los anillos, con las limitaciones propias de las observaciones terrestres, de $[0^\circ, 6^\circ]$ para el ángulo de fase y de $[0^\circ, 26^\circ]$ para la apertura de los anillos.

Después de la inserción orbital en Saturno (SOI) por sus siglas en inglés (*Saturn Orbital Insertion*), el interferómetro CIRS de la nave Cassini adquirió una extensa cantidad de datos térmicos de los anillos principales de Saturno con diferentes geometrías de observación no posibles desde la Tierra.

Inicialmente, algunas de las primeras mediciones de temperatura del lado iluminado de los anillos, muestran que son similares a la del planeta (94K), (Ingersoll *et al.*, 1980). Algunos otros estudios revelaron que la temperatura variaba principalmente con el ángulo de elevación solar (B' varía entre

$\approx -23^\circ$ y 0°), (Murphy, 1973), (Nolt *et al.*, 1980). Observaciones sucesivas desde Tierra y de naves espaciales lo confirman.

Los datos demostraron que las temperaturas de los anillos A, B y C varían de 29-38 K, 22-34 K y 18-23 K, respectivamente. Curiosamente, también los lados no iluminados de los anillos de Saturno muestran variaciones importantes de temperatura con la disminución de B' evidenciando transferencia de energía dentro de los mismos anillos.

A pesar, de que las observaciones hechas por Cassini y el estudio que se ha realizado de ellas, han mejorado nuestro entendimiento de los anillos, se conoce poco de la física de las partículas de los anillos, en especial sus propiedades térmicas.

Actualmente, existen numerosas observaciones que no tienen alguna explicación, como es el caso de los efectos de oposición (Déau *et al.*, 2019) y (Spilker *et al.*, 2018), donde se observa un aumento de temperatura a ángulos de fase cercanos a 0° . A pesar de que el comportamiento térmico de los anillos dista mucho de ser entendido, los modelos térmicos nos ayudan a estudiar e incluso determinar las propiedades de los anillos relativas a su composición, su estructura y su dinámica. A continuación discutimos algunos aspectos de los principales modelos térmicos de los anillos. Estos, se pueden dividir en dos tipos, el monocapa y el multicapa.

5.1. Modelo de Kawata, 1975.

El modelo de Kawata, (Kawata y Irvine, 1975) supone que los anillos son una arreglo vertical de capas sucesivas o multicapas. El análisis se hace a través de la solución de la ecuación de transferencia radiativa:

$$4\pi \int d\lambda K_\lambda J_\lambda = \int d\lambda \int_{4\pi} d\Omega K_\lambda S_\lambda, \quad (5.1)$$

$$J_\lambda = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} d\Omega I_\lambda, \quad (5.2)$$

$$S_\lambda = \frac{a_\lambda}{4\pi} \int_{4\pi} d\Omega I_\lambda + (1 + a_\lambda) B_\lambda(T), \quad (5.3)$$

$B_\lambda(T)$ es la función de Planck para la temperatura T , K_λ es el coeficiente de extinción (absorción más dispersión) $\int d\Omega$ indica la integración de las dos coordenadas angulares (conocido como ángulo sólido), λ es la longitud de onda, a_λ es el albedo, I_λ es la intensidad específica.

Se comprobó que un modelo multicapa homogéneo es incompatible con la variación de brillo observada en el infrarrojo de los anillos A y B, aunque puede ajustarse a la del anillo C. Se presenta el modelo multicapa no homogéneo alternativo con partículas oscuras dentro de una bruma brillante de pequeñas partículas heladas con el fin de satisfacer los datos infrarrojos disponibles de los anillos A, B y C.

El modelo plantea una ley de potencias para la distribución de las partículas:

$$dn \propto p^{-s} dp, \quad (5.4)$$

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

La temperatura de brillo del anillo se calculó con la siguiente ecuación:

$$B_{\lambda}(T^*) = \frac{1}{\mu_0} \int_0^{\tau} d\zeta e^{-\frac{\zeta}{\mu_0}} B_{\lambda} \left[T^{\odot+D+\hbar}(\zeta, \mu_0) \right], \quad (5.5)$$

T^* es la temperatura de brillo del anillo.

ζ es la profundidad óptica

$T^{\odot+D+\hbar}$ son las fuentes de calentamiento para el anillo, el Sol, Saturno y el calentamiento mutuo entre las capas del anillo.

$\mu_0 = \cos\theta_0$, donde θ_0 es el ángulo de incidencia de radiación solar.

Cada anillo se representa con distintas nubes con diferente cantidad de partículas de hielo. En cada caso, la efectividad del modelo depende de sí las partículas oscuras emiten sólo a través de uno de sus hemisferios, lo que implica rotación lenta o inercia térmica baja.

Los resultados basados en el modelo multicapa no homogéneo pueden resumirse como sigue: Los datos observados de brillo infrarrojo de los tres anillos se explican en términos del diferente espesor óptico sin que existan diferencias significativas en las propiedades de las partículas del anillo, como el albedo, la velocidad de giro y los tamaños. Pero cada anillo contiene una cantidad diferente de partículas brillantes de neblina y su concentración dentro de los anillos depende de si las partículas oscuras emiten radiación mayoritariamente desde un hemisferio (rotador lento y/o baja inercia térmica).

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

5.2. Modelo de Froidevaux, 1981.

El modelo de Froidevaux (1981) utiliza la hipótesis de que las partículas de los anillos son esféricas de radio r , idénticas y equidistantes. La principal diferencia de las regiones es su profundidad óptica τ . Se presenta una función experimental $C(B', \tau)$, designada función de sombra (*shadowing function*) que describe la fracción de área de las superficie de las partículas de los anillos que no reciben iluminación o están bajo sombra y su variación con el ángulo de elevación solar. Una correcta función C , es necesaria para obtener una correcta descripción de la temperatura.

En este modelo, las fuentes más relevantes de calor son la radiación solar directa y la radiación térmica de Saturno (F_{sol} y F_{th} , respectivamente), también se toma en cuenta la energía reflejada por la atmósfera

de Saturno (F_{ref_s}), así como la reflejada y emitida por las partículas de los anillos (F_{ref_p} y F_{th_p}).

Las ecuaciones son las siguientes:

$$F_s = (1 - A_v)C \frac{S_\odot}{r^2}, \quad (5.6)$$

$$F_{th} = \sigma T_s^4 \frac{\Omega}{\pi}, \quad (5.7)$$

$$F_{rs} = A_s(1 - A_v) \frac{S_\odot}{r^2} \frac{\Omega}{2\pi}, \quad (5.8)$$

$$F_{rp} = A_v(1 - A_v)C \frac{S_\odot}{r^2} \frac{\Omega_p}{4\pi}, \quad (5.9)$$

En estas ecuaciones, $S_\odot/r^2 = 1492Wm^2$, es el flujo promedio recibido desde el Sol en la órbita de Saturno $r = 9.58UA$, $A_s = 0.34$, $T_s = 94K$ y $\sigma = 5.6705 \times 10^{-8}Wm^{-2}K^{-4}$ es la constante de Stefan-Boltzmann. A_v es el albedo de Bond de las partículas el cual es uno de los parámetros que se obtienen del ajuste del modelo, A_s es el albedo de Saturno. r es la distancia heliocéntrica hasta la región de observación (también designada como *huella*); $\Omega = \int \hat{n} \cdot d\vec{s}/\mathcal{R}^2$ es el ángulo sólido subtendido por el disco plano aparente de Saturno visto desde una partícula del anillo; $\Omega_p = 6[1 - \exp(-\tau)]$ es el ángulo sólido subtendido por las ocho partículas vecinas.

La ecuación de balance de energía esta dada por la suma de los flujos, $\sum_i F_i$:

$$F_s + F_{th} + F_{rs} + F_{rp} = f\varepsilon\sigma T_p^4 \left(1 - \frac{\Omega_p}{4\pi}\right), \quad (5.10)$$

que se basa en la ecuación de Planck para un cuerpo negro. La suma toma en cuenta la distribución de la temperatura, es decir, las tres fuentes de radiación: el Sol, Saturno y el intercambio de energía entre las partículas de los anillos.

El flujo térmico mutuo de las partículas del anillo está incluido en el lado izquierdo de la ecuación. Se supone que la emisividad térmica de las partículas $\varepsilon = 1$; f es el parámetro de rotación. Como referencia, si la partícula rota con un período mucho más pequeño que el tiempo de relajación térmica de la partícula, la partícula se considera un rotador rápido isotérmico que radia sobre toda su superficie y $f = 4$. En cambio, si $f = 2$, la partícula se considera un rotador lento, que en principio radiará sobre un solo hemisferio. El hecho de que las partículas sean rotadores lentos o rápidos hace una gran diferencia en la temperatura de los anillos.

La función de sombreado de Froidevaux $C(B', \alpha_s)$, se define de la siguiente manera:

$$C(B', \alpha_s) = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\arccos[\beta(B, \alpha_s)] - \beta(B, \alpha_s) [1 - \beta^2(B, \alpha_s)]^{\frac{1}{2}} \right), \quad (5.11)$$

donde $\beta(B, \alpha_s) = \alpha_s \sin B = \frac{a_s}{r} \sin B$,

$$\alpha = \frac{a}{r}$$

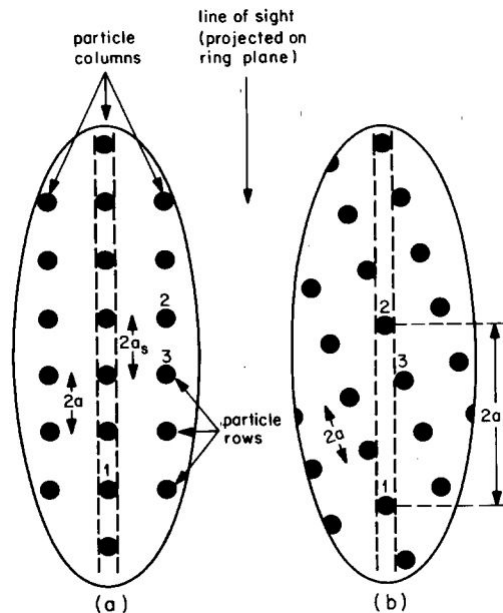


Figura 5.1: La elipse es la proyección de una abertura circular sobre el plano de los anillos. La distancia interpartícula $2a$ puede variar dependiendo del ángulo de visión en el plano del anillo. El máximo sombreado es $\frac{a_s}{r} = \frac{a}{r} = \sqrt{10}$, el mínimo sombreado es $\frac{a_s}{r} = \left(\frac{a}{r}\right)^2$. En (a) la partícula 2 es sombreada por la partícula 3 y el observador ve hoyos entre las columnas de partículas. En (b) la partícula 2, es sombreada mucho menos por la partícula 1 y no se ven hoyos entre las partículas. Imagen Froidevaux (1981).

Los modelos básicos incluyen estimaciones del máximo y mínimo del sombreado interpartícula utilizando una aproximación monocapa.

Se calculó el balance de radiación, con lo cual se obtuvo una temperatura física (cinética) de las partículas en equilibrio con la radiación del Sol, Saturno y las partículas vecinas. La temperatura de brillo en el infrarrojo como función de B' , se calculó y se comparó con los datos disponibles a $20 \mu\text{m}$. Los anillos A y B son modelados como una monocapa ópticamente gruesa, o equivalentemente, una hoja plana radiando desde un solo lado. Esto condujo a un contraste de temperaturas entre los dos lados, atribuyéndose a la baja inercia térmica de las partículas. El buen ajuste para el modelo monocapa que se obtuvo en los anillos A y B, no descartó que dichos anillos tuvieran muchas partículas de espesor, es decir, un anillo multicapa que se comporta como monocapa en el infrarrojo y como una función del ángulo de inclinación.

Partículas con alto albedo $A_v \geq 0.5$ podrían ajustar los datos en el infrarrojo, si se consideran que solo radian desde uno de sus hemisferios, debido a la baja rotación o la baja inercia térmica o a ambas. Alternativamente, las partículas isotérmicas y significativamente oscuras $A \leq 0.3$, más que las partículas del anillo A y B, pueden reproducir variaciones similares de brillo con la inclinación

del anillo. En cualquier caso, se encontró que la temperatura física de las partículas del anillo C son significativamente más calientes que las de los anillos A y B, en multicapa o en monocapa.

5.3. Modelo Morishima, 2009.

Morishima *et al.* (2009), presentan un modelo para la emisión térmica en el infrarrojo en los anillos de Saturno basada en un modelo multicapa, considerando:

1. La ecuación clásica de transferencia radiativa está resuelta tanto para el visible como para el infrarrojo.
2. La heterogeneidad vertical de las frecuencias de rotación de las partículas del anillo se toman en cuenta.
3. El transporte de calor debido al movimiento de las partículas en las direcciones vertical y azimutal.

Se adopta una distribución bimodal que caracteriza la rotación de las partículas, en el cual las partículas pequeñas con rotación rápida (aquellas cuyos períodos de rotación son más breves que el tiempo de relajación térmica) con inclinaciones orbitales grandes una temperatura homogénea en toda su superficie, mientras que partículas grandes que no giran (convencionalmente llamadas rotadores lentos) con inclinaciones orbitales pequeñas son calentadas solo en su lado iluminado.

Los parámetros físicos más importante, los cuales controlan las temperaturas del anillo, son el albedo en luz visible, la fracción de rotadores rápidos f_{fast} con la profundidad óptica y la inercia térmica.

Este modelo se aplica para observaciones terrestres y reproduce muy bien las temperaturas observadas para los anillos A, B y C, aunque no se pueden determinar valores exactos de los parámetros físicos debido a la degeneración entre ellos.

Sin embargo, el rango del albedo estimado está en los siguientes límites:

1. Para el anillo A: $(0.00, 0.52 \pm 0.05)$
2. Para el anillo B: $[0.55 \pm 0.07, 0.74 \pm 0.03)$
3. Para el anillo C: $(0.51 \pm 0.07, 0.74 \pm 0.06)$

Los valores mínimos y máximos son obtenidos suponiendo que todas las partículas del anillo son tanto rotadores lentos como rotadores rápidos (bimodal).

Para el anillo C, al menos una fracción o porcentaje de los rotadores lentos ($f_{fast} \leq 0.9$) es necesario que se ajusten para un albedo positivo.

Para los anillos A y B, un porcentaje no cero ($f_{fast} \geq 0.1 - 0.2$) de rotadores rápidos es favorable, ya que a partir del incremento de la temperatura de brillo con un aumento del ángulo de elevación solar se mejora con una fracción de rotadores rápidos.

5.4. Modelo híbrido

En el modelo monocapa de (Froidevaux, 1981) modificado por (Flandes *et al.*, 2010) y generalizado en (Flandes *et al.*, 2021, García-Reyes y Flandes, 2021), se estudió el balance de energía absorbida y reemitida; mientras que el modelo multicapa, como el de (Kawata, 1983), se basó en la ecuación de transferencia radiativa, en esta se puede estimar tanto la velocidad de rotación de las partículas del anillo, por medio de un parámetro que llamaremos *factor de rotación*, así como sus albedos.

En (Flandes *et al.*, 2021, 2010), se propone que los anillos están hechos tanto de monocapas como de multicapas de partículas, además, se estudió el balance de energía absorbida y reemitida, así mismo el albedo de las partículas consideradas como cuerpos negros.

De la ecuación 5.10, tenemos:

$$T_p^4 = \frac{F_s + F_{th} + F_{rs} + F_{rp}}{f \varepsilon \sigma (1 - \frac{\Omega_p}{4\pi})} \quad (5.12)$$

Sustituyendo cada expresión de flujo, Ecuaciones 5.6 a 5.9 en el numerador de 5.12 y agrupando las constantes como:

$$c_0 = \varepsilon \sigma (1 - \Omega_p/4\pi), \quad (5.13)$$

$$c_1 = \frac{S_{\odot}}{r^2} \frac{1}{c_0}, \quad (5.14)$$

$$c_2 = \frac{S_{\odot}}{r^2} \frac{\Omega_p}{4\pi} \frac{1}{c_0}, \quad (5.15)$$

$$c_3 = \frac{S_{\odot}}{r^2} \frac{A_s \Omega}{2\pi} \frac{1}{c_0}, \quad (5.16)$$

$$c_4 = \frac{\sigma T_s^4 \Omega}{\pi} \frac{1}{c_0}, \quad (5.17)$$

la temperatura de cada partícula se puede escribir como:

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{1}{f} [(c_1 + c_2 A_v) C + c_3] (1 - A_v) + c_4}, \quad (5.18)$$

El primer modelo, (Flandes *et al.*, 2010), se restringe al anillo C, utiliza datos del espectrómetro CIRS e implementa funciones de sombra numéricas generadas a partir de anillos simulados con arreglos

tridimensionales de partículas esféricas con superficies lambertianas creadas por computadora ¹. La función de sombreado es una pieza clave, la cual se reprodujo con una función numérica, por medio de la técnica de *ray tracing*, un método computacional con el que se reproducen efectos ópticos como la reflexión y refracción siguiendo el camino de fotones o haces individuales desde la fuente hasta un objeto o superficie dada y hasta el observador.

Altobelli *et al.* (2009) introduce una función analítica de sombreado (que puede reemplazar la función experimental de Froidevaux). La función está descrita por la siguiente ecuación:

$$C(B', \tau) = \frac{\sin B'}{1 - \exp(-\tau)} \left[1 - \exp\left(\frac{-\tau}{\sin B'}\right) \right], \quad (5.19)$$

Donde B' es el ángulo de elevación solar; τ es la profundidad óptica.

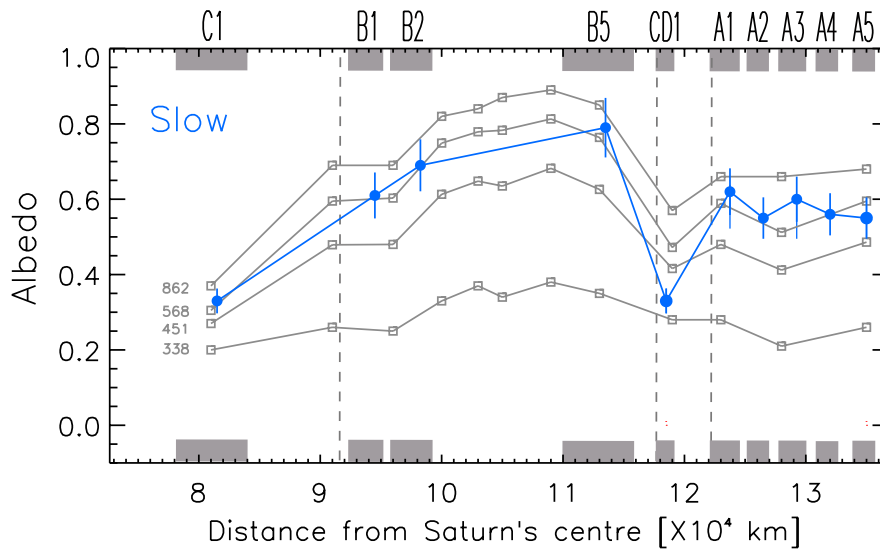


Figura 5.2: Albedos obtenidos con la función numérica, suponiendo rotadores lentos $f = 2$ (adaptada de Flandes *et al.* (2021)).

Esta aproximación se generaliza en (Flandes *et al.*, 2021, García-Reyes y Flandes, 2021), donde las distribuciones de partículas usadas para simular los anillos siguen leyes de potencias estándar como la propuesta por (Cuzzi *et al.*, 2009):

$$dn(a) = n(a)da \propto a^{-q} da, \quad (5.20)$$

Tanto el albedo de Bond como el parámetro de rotación son dos de los parámetros más importantes para definir la temperatura del anillo. Con este método se reproducen las temperaturas de las diez

¹Una superficie lambertiana, es una superficie ideal que refleja la radiación incidente de manera uniforme en todas direcciones.

Cuadro 5.1: Tabla de valores de albedos para las regiones de estudio, suponiendo rotadores lentos $f=2$. Flandes *et al.* (2021)

Región del anillo	Albedo
C1	0.33
B1	0.61
B2	0.69
B5	0.79
CD1	0.33
A1	0.62
A2	0.55
A3	0.60
A4	0.56
A5	0.55

regiones de los anillos (una del anillo C, una del anillo CD. Los anillos A y B se separan en 5 y 3 regiones respectivamente) principales satisfactoriamente.

El modelo se evalúa comparando los valores del albedo de Bond teóricos con los obtenidos por el instrumento ISS de Cassini (*Imaging Science Subsystem*) a una longitud de onda $451 \text{ nm} \leq \lambda \leq 650 \text{ nm}$. Con lo anterior se obtiene la función de sombreado $C(B', \tau)$, al igual que en (Flandes *et al.*, 2010), se deriva el albedo de diferentes regiones de estudio y el factor de rotación f .

La comparación sugiere una prevalencia de partículas que rotan lentamente o rotadores lentos, con poblaciones de rotadores intermedios en los anillos C y CD. Al final, esto significa que, en el mejor de los casos, en promedio, las partículas de los anillos que son iluminadas por el Sol mantienen temperaturas distintas entre el hemisferio que da al Sol y su hemisferio opuesto.

Con esta aproximación es posible reproducir exitosamente las variaciones de temperatura del anillo C con B' , e incluso compensar las variaciones de temperatura debido al sombreado adicional aparente a

ángulos de fase elevados en el campo de visión, tal que los valores obtenidos para el albedo, 0.30, 0.35 son consistentes.

Por ser relevante para esta tesis y como apoyo a nuestro análisis en los capítulos posteriores, incluimos las imágenes simuladas de cada región obtenidas en Flandes *et al.* (2021), en las Figuras 5.3, 5.4 y 5.5.

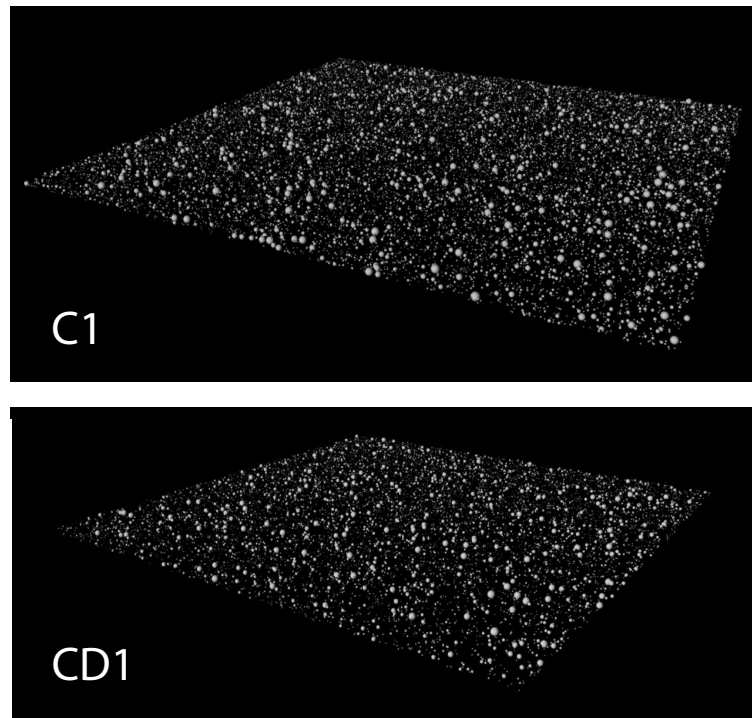


Figura 5.3: Reproducción de las regiones de estudio del anillo C, C1 y la División de Cassini CD1 con técnica *ray tracing* y datos de UVIS, de acuerdo a Flandes *et al.* (2021), García-Reyes y Flandes (2021). Regiones con distribución aleatoria de partículas grandes, prevalencia de partículas pequeñas y homogéneas, las regiones son poco densas y similares en anillos diferentes, las partículas se consideran esféricas y lambertianas.

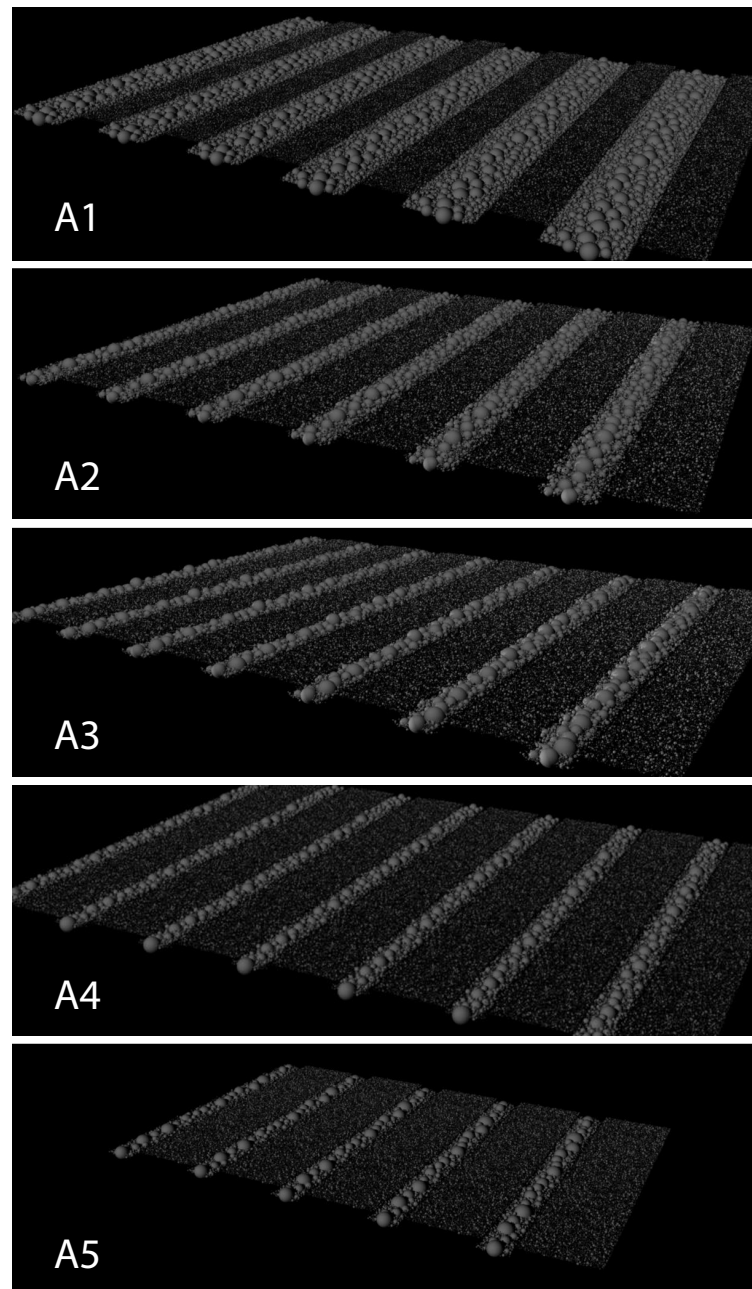


Figura 5.4: Reproducción de las regiones de estudio del anillo A, con técnica *ray tracing* y datos de UVIS, de acuerdo a Flandes *et al.* (2021), García-Reyes y Flandes (2021). Las regiones A2-A5 son muy similares: regiones densas de partículas grandes cada vez más estrechas, en tanto que las partículas pequeñas se concentran en franjas anchas y menos densas. La región A1 muestra franjas similares en cuanto al ancho, sin embargo, las franjas densas con partículas grandes están agrupadas al centro en una franja aún más estrecha.

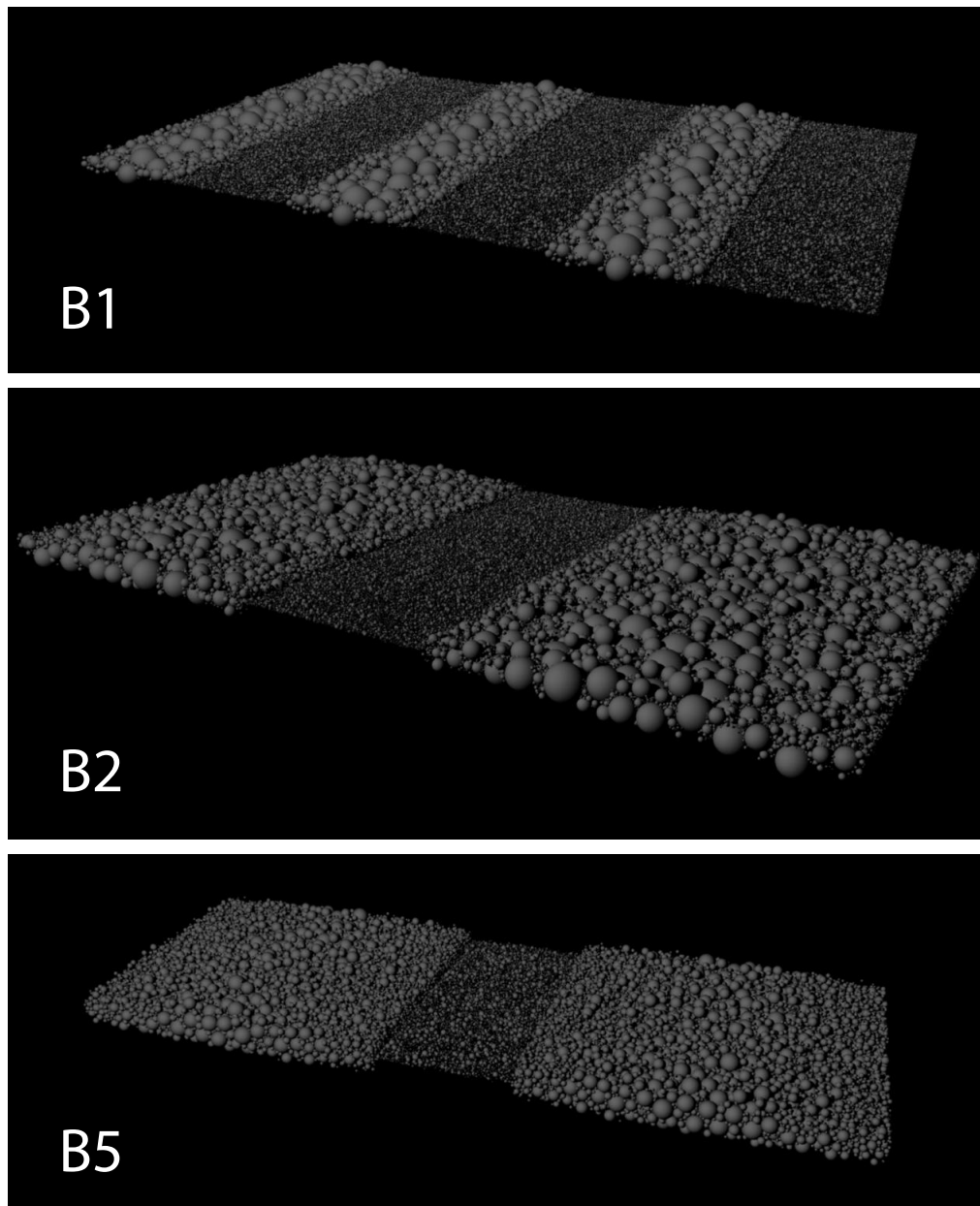


Figura 5.5: Reproducción de las regiones de estudio del anillo B: B1, B2 y B5, con técnica *ray tracing* y datos de UVIS, de acuerdo a Flandes *et al.* (2021) y García-Reyes & Flandes, 2021. Serie alternante de regiones muy densas de partículas pequeñas y grandes. La extensión de las franjas de partículas grandes aumenta desde la región B1 hasta B5, llegando a ser dominante en esta última. Las partículas grandes parece que desalojan a las más pequeñas a las orillas en las franjas de partículas grandes en las regiones B1 y B5. La región B2 es más homogénea en cuanto a la distribución de sus partículas en las franjas de partículas grandes.

Capítulo 6

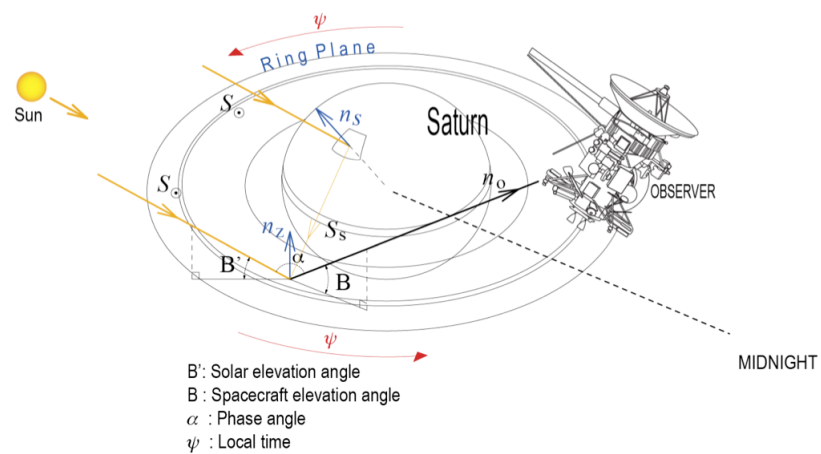
Datos utilizados en esta tesis

En los Capítulos 7, 8 y 9, usamos datos de los anillos tomados de (Flandes *et al.*, 2010) y cuya gráfica se reproduce en la Figura 6.4 (los puntos de colores muestran la temperatura a diferentes elevaciones del Sol) y datos de profundidad óptica tomados de (Colwell *et al.*, 2009) (perfil gris de fondo) de los instrumentos CIRS y UVIS entre el 2004, cuando la nave entró en órbita alrededor de Saturno y 2009 cuando Saturno tuvo su equinoccio. En el Capítulo 10 se reportan sólo los conjuntos de datos CIRS usados y analizados por Juárez-Aparicio, 2017 y en el Capítulo 11, se usan los datos y análisis reportados por (Leyrat *et al.*, 2008).

6.1. Geometría de observación

Para entender los datos es necesario primero entender la geometría de observación y la nomenclatura usada.

- Ángulo de elevación solar B' , se define como el ángulo entre el plano de los anillos y el vector que une Saturno con el Sol. Sí $B' > 0$ el Sol ilumina la parte norte de los anillos, sí $B' = 0$ es el equinoccio de Saturno, los anillos están de canto, sí $B' < 0$ el sol ilumina la parte sur.
- 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 está en el intervalo $[-90^\circ, 90^\circ]$, donde el valor positivo indica la dirección norte y el valor negativo representa la dirección sur.
- Ángulo de fase α 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 esta en el intervalo $[0^\circ, 180^\circ]$.
- Ángulo de tiempo local Ψ , 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 al Sol. Los ángulos se miden en sentido opuesto a las manecillas del reloj.



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

Figura 6.1: Geometría para las observaciones de la nave Cassini. Imagen Dr. Alberto Flandes.

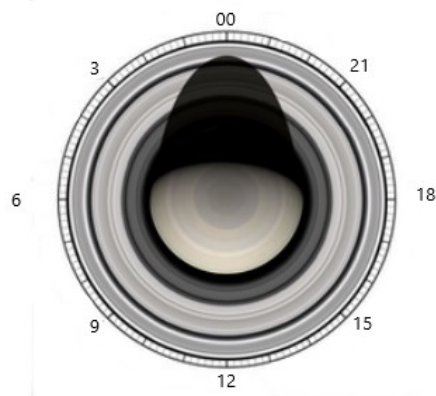


Figura 6.2: Esta imagen muestra como se divide las horas en el planeta Saturno (similar a la Tierra). El Sol enfrente indica las 12 h o mediodía, el punto diametralmente opuesto indica las 0 h. Imagen Dr. Alberto Flandes.

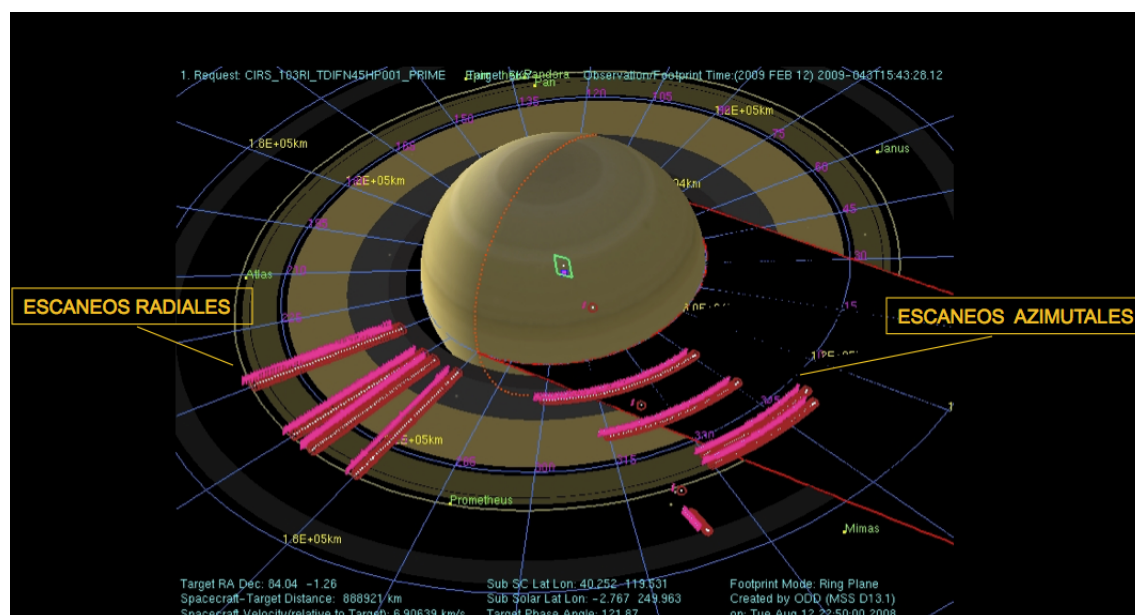


Figura 6.3: En esta imagen se muestran los tipos de escaneos tanto radiales como azimutales que efectuó la nave Cassini con el instrumento CIRS. *Imagen: Cassini CIRS Team*

6.2. Detalles sobre los datos del espectrómetro CIRS

En general, la ventaja de los datos del CIRS es que cubren un rango amplio de elevaciones solares entre -22° y 0° cuando el Sol iluminaba el lado sur (hacia el sur de la eclíptica) de los anillos. En los datos que se usan en los Capítulos 7, 8 y 9, las distancias medias de la nave a los anillos fue de $20R_S$ ¹ correspondientes a FOVs o campos de visión sobre los anillos de unos 5000 km . La hora local o ángulo azimutal con respecto a Saturno de las mediciones está en el intervalo de 4.7 horas y 20.0 horas (donde mediodía, o la dirección Saturno-Sol, corresponde a las 12.0 horas). Los ángulos de fase (α) están entre 0.0° y 70.9° y el rango de elevación de la nave (B) con respecto a los anillos está entre -2.6° y 34.0° . Para mayor detalle ver la Tabla 6.2. Se consideran diez regiones de los anillos principales ver Tabla 6.1 donde se supone que la profundidad óptica, τ , en cada región es constante. Los límites de estas regiones son relativamente estándares y se han usado en varias publicaciones por diferentes autores. En el contexto anterior, el anillo C puede, en general, separarse en dos regiones, sólo consideramos una que llamamos C1. La segunda región incluye las mesetas, que no consideramos. La División Cassini, como el anillo C, es un anillo ópticamente delgado, pero con una estructura mucho más compleja y también se puede separar en tres regiones claras de las cuales la región central es mucho menos uniforme y tiene mayores variaciones de τ . Solo consideramos la región más interna que designamos CD1, cuya pendiente es pequeña y muestra un perfil de profundidad óptica más plano. Los anillos A y B pueden ser separados en cinco regiones cada uno, es decir, A1 a A5 y B1 a B5. En el caso del anillo A, incluimos las cinco regiones en el análisis y para el anillo B, las regiones B1, B2 y B5.

¹ R_S : Radios de Saturno $\approx 60300\text{ km}$

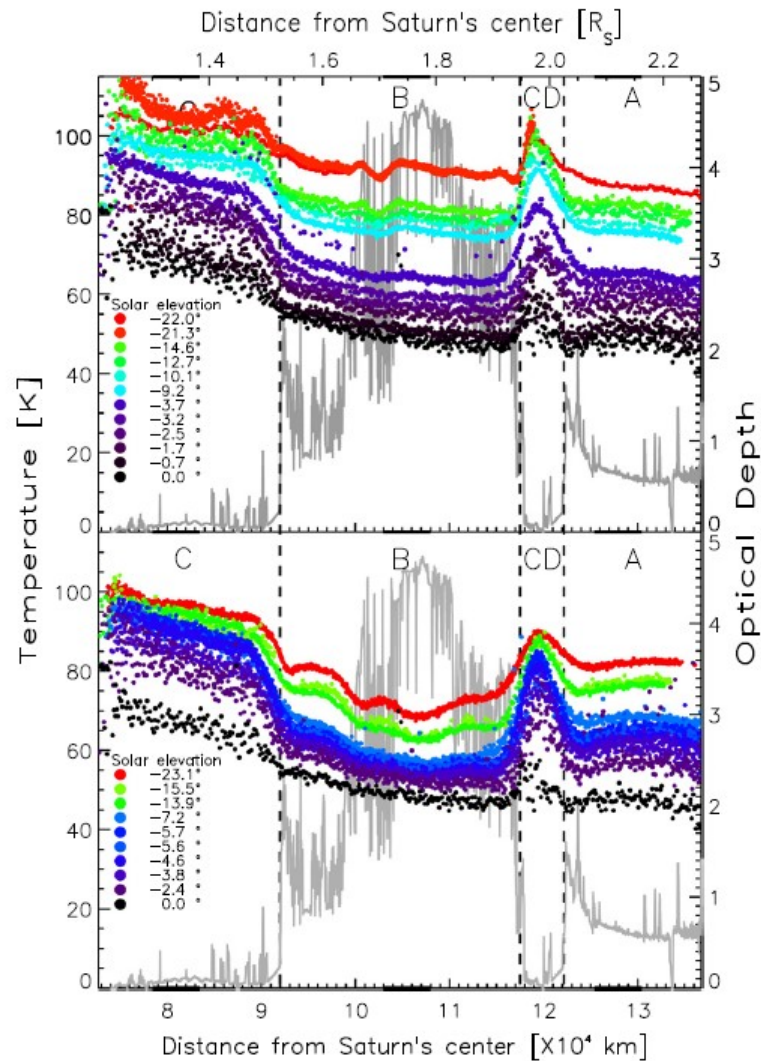


Figura 6.4: Datos de Temperatura (puntos de colores) y profundidad óptica (perfil gris en el fondo) de los anillos principales de los instrumentos CIRS y UVIS, respectivamente. Los datos de temperatura están en función del ángulo de elevación solar B' y corresponden tanto para el lado iluminado como para el no iluminado entre 2004 y 2009. Gráfica tomada de Flandes *et al.* (2010).

Cuadro 6.1: Fronteras radiales de las regiones de los anillos en estudio en esta tesis. Flandes *et al.* (2010).

<i>Anillo</i>	$R_{min} \times 10^3 km$	$R_{max} \times 10^3 km$
C1	79.5	84.0
B1	93.0	96.0
B2	96.5	100.0
B3	100.5	104.0
B4	104.5	110.0
B5	110.5	116.5
CD1	118.0	119.0
A1	122.5	125.0
A2	125.5	127.5
A3	128.0	130.5
A4	131.0	133.0
A5	134.0	136.0

Cuadro 6.2: Geometría de los escaneos del lado iluminado. Flandes *et al.* (2010).

<i>Scan</i>	<i>Year</i>	<i>Day</i>	$B'(deg)$	$\alpha(deg)$	$B(deg)$	$\psi(h)$
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	-34.4	20.0
12	2009	224	0.0	70.9	20.3	9.5

Cuadro 6.3: Geometría de los escaneos del lado no-iluminado. Flandes *et al.* (2010).

<i>Scan</i>	<i>Year</i>	<i>Day</i>	$B'(deg)$	$\alpha(deg)$	$B(deg)$	$\psi(h)$
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	-34.4	20.0
12	2009	224	0.0	70.9	20.3	9.5

6.3. Datos del espectrómetro UVIS

Los datos que consideramos, son los datos de profundidad óptica que se usan como referencia para definir las distintas regiones de los anillos. Los datos se grafican simultáneamente con los datos del instrumento CIRS en las gráficas presentadas en las Figuras 7.1 a 7.4, 8.1 y 9.2 a 9.5. Los datos de UVIS se obtuvieron a partir de múltiples ocultaciones de estrellas de referencia con brillo conocido (como η -Carinae) y su resolución es < 500 km sobre el plano de los anillos. La profundidad óptica, τ se considera que puede compararse con la profundidad óptica normal, aunque por la geometría de las observación es, en el mejor de los casos, cercana a los 70° .

Capítulo 7

Variación de temperatura con respecto a la profundidad óptica

La profundidad óptica τ es una medida adimensional que describe qué tan transparente u opaco es un medio a la radiación. 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.

Generalmente, se considera la profundidad óptica normal (τ_n) o la profundidad óptica dinámica (τ_{dyn}). Ambas son cantidades adimensionales. τ_n depende de una geometría de observación restringida y τ_{dyn} no necesariamente. Astronómicamente, la profundidad óptica se mide utilizando la técnica de ocultamiento estelar, Por ejemplo, para medir la profundidad óptica de los anillos de Saturno, se observa la variación de brillo de una estrella de referencia (la misión Cassini usaba el sistema η -Carinae).

Físicamente, la profundidad óptica normal τ_n se define como:

$$\tau_n = \mu l n \left[\frac{I_o}{I - b} \right] \quad (7.1)$$

Donde I es la intensidad medida del haz ocultado, I_o es la intensidad no ocultada, b es cualquier señal de fondo y $\mu = |\sin B|$ donde B es el ángulo entre el observador con respecto al plano de los anillos, también llamado ángulo de emisión.

Se definen así, medios ópticamente opacos y ópticamente transparentes:

1. Si $\tau \gg 1$ se tiene un medio opaco.
2. Si $0 \leq \tau \ll 1$ se tiene un medio transparente.

Sí tenemos un medio que puede considerarse granular o compuesto de un conjunto de partículas, como podemos suponer con los anillos de Saturno, es conveniente y más preciso definir la profundidad óptica dinámica. Matemáticamente, la profundidad óptica dinámica se define como:

$$\tau_{dyn} = \frac{\sum_i \pi s_i^2}{A_{total}} \quad (7.2)$$

que es el cociente de la suma total de las secciones transversales de las partículas que conforman el medio o una fracción de éste y la sección o área donde se distribuyen las partículas, A_{total} , es una cantidad básica empleada en los experimentos dinámicos. Esta es la profundidad que se utiliza en las gráficas que aparecen más adelante.

Nótese que mientras que τ_n está en el intervalo $[0, 1]$, τ_{dyn} puede ser mayor que 1, pues las partículas no están necesariamente restringidas a un sólo plano, sino a varios. En el caso de los anillos principales, la profundidad óptica y sus variaciones definen sus fronteras y cada uno de los anillos C, B, CD y A o divisiones más finas dentro de cada uno de ellos como se puede ver en (Flandes y García-Reyes, 2021, Flandes *et al.*, 2010). Para estos anillos $0 < \tau < 5$. Los anillos ópticamente delgados son el anillo C y la División de Cassini. Partes del anillo C como de la División de Cassini se pueden considerar anillos uniformes, pero no totalmente. El anillo C tiene una región entre 1.39 y $1.51 R_S$ conocida como la zona de mesetas o *plateaus* que tiene variaciones abruptas de profundidad óptica donde podría haber regiones donde las rocas que componen los anillos se concentran. En cualquier caso, los anillos C y CD pueden considerarse capas de partículas que están separadas entre sí.

Los anillos A y B tiene una estructura más compacta y en particular el anillo B está compuesto por varias capas de partículas de diversos tamaños.

En las Figuras 7.1 a 7.4 se resalta el hecho de que los perfiles de temperatura y profundidad óptica en cada anillo son visiblemente distintos. Se observa una casi anticorrelación entre temperatura y profundidad óptica. En estas figuras se muestran datos de máxima elevación solar y, por tanto, de máxima iluminación y temperatura, para hacer más evidentes los cambios. Los anillos ópticamente delgados, C (Fig. 7.1) y CD (Fig. 7.3) muestran variaciones casi uniformes, tanto en profundidad óptica como en temperatura (C de ~ 0.08 a ~ 0.3 ; y entre 95 K y 107 K y CD entre 0.1 y 1.0 ; y entre 90 K y 98 K). En el caso de los anillos ópticamente gruesos, el anillo A es en el que se observa un perfil más uniforme (Fig. 7.4) y con variaciones más suaves en profundidad óptica y temperatura (de ~ 0.50 a ~ 1.50 ; y entre 85 K y 93 K). El anillo B (Fig.7.2) muestra las variaciones más abruptas en profundidad óptica (de ~ 1.00 a ~ 5.00), aunque sus variaciones de temperatura no tanto (entre 90 K y 95 K), pero con una depresión alrededor de los $1.7R_S$. Tanto en el anillo A, y especialmente en el B, las múltiples y sucesivas oscilaciones en los valores de τ evidencian la estructura que se intenta reproducir en las Figuras 5.4 y 5.5 con sucesiones de bandas densas y tenues.

Se pueden observar algunos detalles relevantes locales. Por ejemplo, se observan que en la región A2, $[125\ 500, 127\ 500]$ km, la temperatura decrece radialmente, en cambio la profundidad óptica dinámica es casi constante, salvo los picos provocados por las resonancias de las lunas Mimas y Jano.

En la región A3, $[128\ 000, 130\ 500]$ km, esta es la zona más uniforme del anillo A, ya que tanto la temperatura como la profundidad óptica son casi constantes. En el borde exterior de esta región se presenta un pico provocado por la resonancia $5 : 4$ Jano.

La región A4, $[131\ 000, 133\ 000]$ km, es muy similar a la región A3, sin embargo, la resonancia Mimas provoca dos picos en la profundidad óptica.

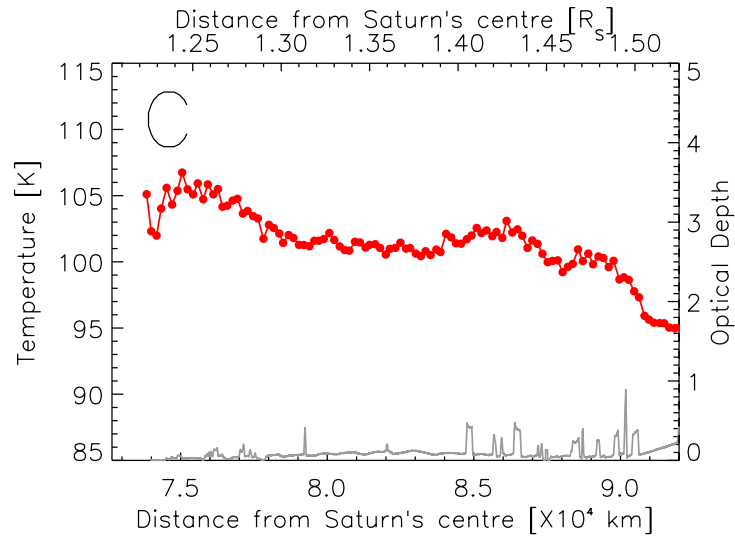


Figura 7.1: Temperatura versus distancia radial/profundidad (puntos rojos) óptica (línea gris) del lado iluminado, hemisferio sur del anillo C observada por el espectrómetro CIRS de la nave Cassini en 2004 cuando los anillos mostraban su apertura máxima, la elevación solar es $B' = -22^\circ$. Esta observación, por su geometría, exhibe la temperatura máxima que puede alcanzar el anillo. En comparación la temperatura del anillo C es la más alta de los anillos principales debido a que su profundidad óptica es muy baja (<0.4 , para la mayoría del anillo) lo que hace que la mayor parte del área de sus partículas componentes reciben la energía solar sin ser bloqueada en esta elevación solar. De hecho, en promedio se observa que las zonas más densas tienen temperaturas más altas.

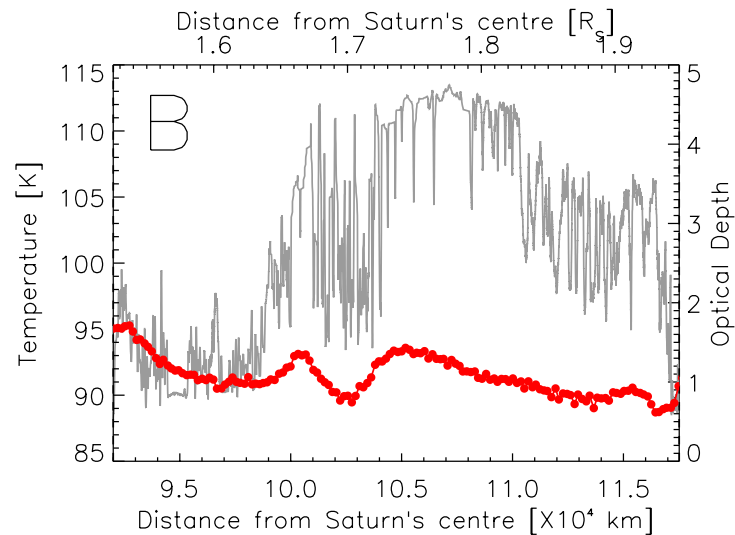


Figura 7.2: Profundidad óptica y temperatura (con B' máxima) del anillo B. La temperatura se mantiene en un intervalo entre 90 a 95 K, la profundidad óptica se manifiesta como la más elevada en el conjunto de anillos principales.

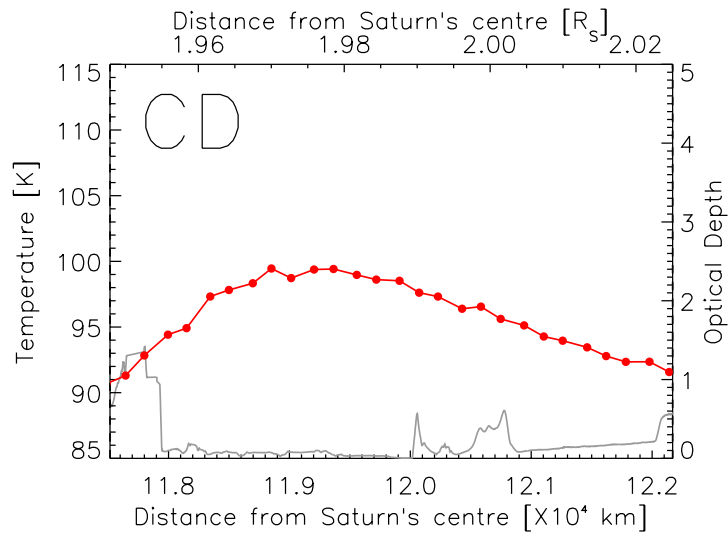


Figura 7.3: Profundidad óptica y temperatura (con B' máxima) del anillo CD. En los extremos de la División de Cassini la temperatura ronda los 91-92 K, en la parte central tiene un máximo rozando los 100 K. Lo anterior denota una relación de proporción inversa entre la temperatura y la profundidad óptica.

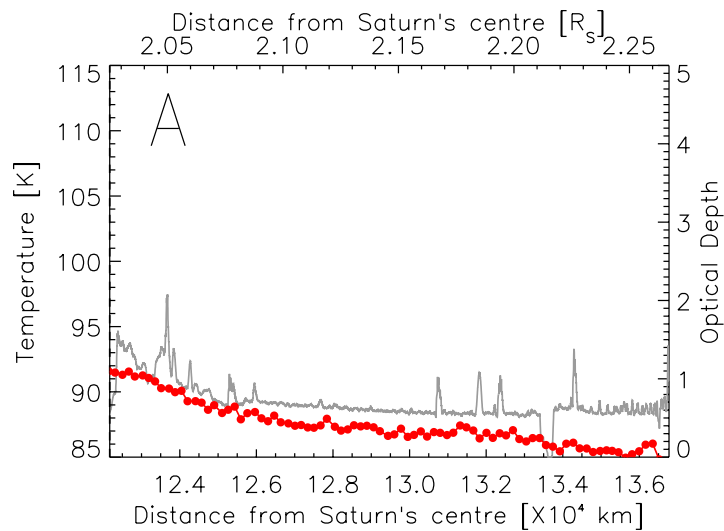


Figura 7.4: Profundidad óptica y temperatura (B' máxima) del anillo A. La temperatura desciende a lo largo del anillo A, desde 92 a 85 K, en tanto la profundidad óptica se mantiene casi constante alrededor de 0.5 a partir de 12.6×10^4 km, salvo algunos picos y depresiones.

La región A5, [134 000,136 000] km, exhibe una variación abrupta de la profundidad óptica provocada por la brecha de Encke al inicio de esta, después de la cual se presenta un aumento en la profundidad óptica debido a la resonancia 6 : 5 de Jano.

Capítulo 8

Variaciones con respecto al ángulo de elevación solar, B'

El ángulo de elevación solar B' , es el ángulo entre el plano de los anillos y el vector que une el centro de Saturno con el Sol. Si $B' > 0^\circ$ el Sol ilumina el norte del planeta, si $B' = 0^\circ$ el planeta está en su equinoccio, si $B' < 0^\circ$ el Sol ilumina el sur del planeta.

Ya que el Sol es la fuente energética principal para los anillos, las variaciones en el ángulo de elevación solar producen los efectos más importantes en la temperatura de los mismos.

Con base en las figuras 8.1 y 8.2 se describe el comportamiento térmico de los anillos de Saturno. La figura 8.2, muestra con mayor claridad, como cambia la temperatura conforme lo hace el ángulo de elevación solar.

8.1. Anillo C

La temperatura se mantiene casi constante o con cambios poco significativos (< 10 K) para $B' < -5^\circ$ (*ángulos de elevación solar grandes*). Para $B' > -5^\circ$ (*ángulos de elevación solar pequeños*), el perfil de temperatura cambia y esta decrece abruptamente (≈ 30 K) desde, poco más de 90 K, hasta casi 60 K.

8.2. Anillo B

En todas la regiones de este anillo, la temperatura disminuye sin cambios abruptos desde cerca de los 90 K hasta alrededor de los 50 K. La menor temperatura se alcanza en la región B5 (≈ 47 K en el equinoccio), que es la región con mayor profundidad óptica. También, en todas la regiones, a mayor B' la temperatura cae más rápido. La transición a la división de Cassini en el región más externa de la región B5 muestra un leve aumento de temperatura a la par de una caída en el valor de la profundidad

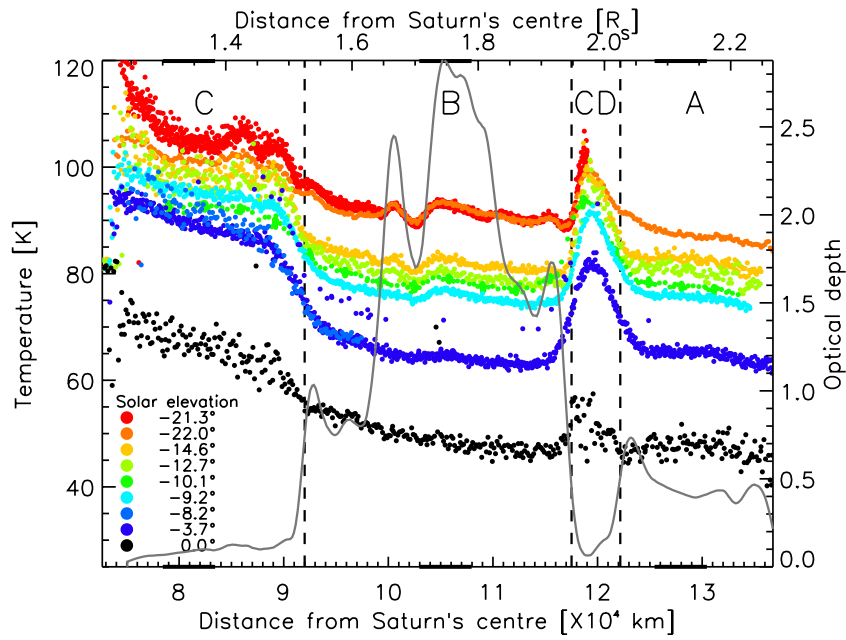


Figura 8.1: Temperatura de los anillos principales con respecto al ángulo de elevación solar B' para el lado iluminado (Adaptación de la Fig. 6.4 de esta tesis).

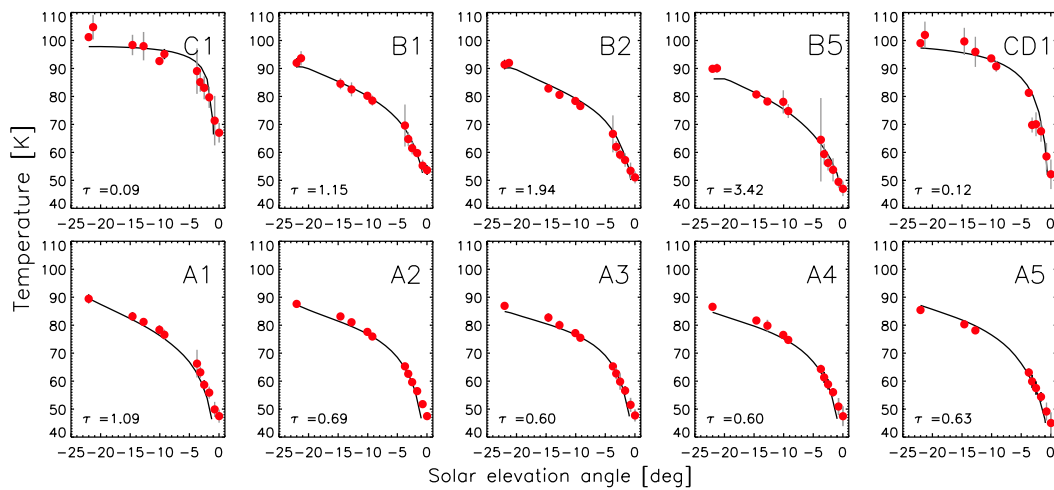


Figura 8.2: Temperatura de las regiones de los anillos principales con respecto al ángulo de elevación solar B' . Los datos que se muestran son los mismos de la figura 8.1 (lado iluminado), pero promediados en cada región y para cada valor de B' , resaltando los cambios de temperatura en cada región. Las barras de error representan el máximo y mínimo de temperatura en el intervalo. La curva que se muestra es el mismo ajuste con el modelo usado en (Flandes *et al.*, 2021). Esta figura se adaptó de la Figura 6 del mismo artículo.

óptica.

8.3. Anillo CD

La forma característica de la gráfica (V invertida) en este anillo, comienza en el extremo izquierdo con una elevación notable de la temperatura y una caída abrupta de la profundidad óptica, prácticamente a cero, (ver la Figura 6.4). La temperatura se mantiene casi constante entre los 100 K y 90 K para ángulos entre -23° y -8° . Para los ángulos mayores y hasta alcanzar el equinoccio la temperatura cae de forma pronunciada desde los 90 K hasta los 50 K. La profundidad óptica es muy parecida a la de la región C1.

8.4. Anillo A

Región A1: Esta región tiene la mayor profundidad óptica ($\tau = 1.09$) de todas las regiones de estudio. Para ángulos pequeños $\approx -23^\circ$ la temperatura comienza a descender a partir de los 90 K un poco más de 20 K. Conforme el ángulo crece $\approx -5^\circ$ y llega al equinoccio la caída de temperatura es abrupta, alcanzando los 45 K.

El comportamiento en las regiones restantes del anillo A es similar. Nótese que la profundidad óptica de estas regiones es parecida con una diferencia máxima de nueve centésimos, la más alta es $\tau = 0.69$ y la más baja de $\tau = 0.60$. La temperatura para ángulos pequeños $\approx -23^\circ$ es un poco menor de los 90 K, conforme este ángulo aumenta hasta los -5° la variación de temperatura es ≈ 20 K. Para ángulos mayores y hasta el equinoccio la variación de temperatura es de ≈ 25 K, alcanzando una temperatura cercana a los 45 K.

De forma general, la temperatura se mantiene casi constante al aumentar el ángulo desde $\approx -23^\circ$ hasta $\approx -5^\circ$ en los anillos con baja profundidad óptica (C1 y CD1), y disminuye ≈ 20 K en los anillos con profundidad óptica mayor, los anillos densos (A y B).

Después de un ángulo de elevación $B' \approx -5^\circ$ y hasta el equinoccio la disminución de temperatura es evidente por lo súbito y lo es más en las regiones con baja profundidad óptica (regiones C1 y CD1). En las regiones de A1 a A5 y B1, B2 y B5 esta disminución de temperatura, también es notable pero no tan pronunciada.

El ajuste de temperatura en la Figura 8.2 (líneas continuas) corresponde a la Ecuación 5.18 con la función de sombreado numérica, a partir de las simulaciones *ray tracing*. Ver las Figuras 5.3, 5.4 y 5.5.

Capítulo 9

Variaciones de temperatura entre el lado iluminado y el lado oscuro

Debido a su inclinación relativa con respecto al Sol y a su movimiento orbital, los anillos muestran una variación en su inclinación a lo largo del año saturniano (29.4 años terrestres) con respecto al Sol. Al estar la Tierra en la parte interna de la órbita de Saturno y más cerca del Sol, nuestra perspectiva es similar a la del Sol. Dos veces en el año de Saturno (casi cada 15 años terrestres) los anillos parecen desaparecer, ver Figura 9.1. El resto del año, el Sol ilumina solamente el hemisferio sur o el hemisferio norte de los anillos.

El lado iluminado de los anillos (*lit*), se define como la parte del anillo que está expuesta a la radiación solar directa. El lado oscuro o no iluminado (*unlit*), ya sea superior o inferior, que no recibe radiación solar.

El equinoccio de Saturno muestra a los anillos de canto, debido a su pequeño grosor, da la impresión de que estos desaparecen, la radiación solar ilumina solo el canto de este disco de anillos, el planeta Saturno sobre la franja vertical morada en la Figura 9.1.

En las Figuras 9.2 a 9.5 se presentan las diferencias de temperaturas entre los lados iluminado y no iluminado para ángulos de elevación solar similares, pero no iguales. En todos los casos, las gráficas muestran, (a) la comparación de temperaturas de ambos lados y (b) la diferencia del promedio de temperatura en cada región (ΔT) de estudio. Enseguida se presenta la tabla correspondiente en donde se consigna la temperatura promedio para el lado iluminado y el lado no iluminado y su diferencia $\Delta T = T_{Lit} - T_{Unlit}$.

De las Figuras 9.2a y 9.2b, se tiene que la diferencia de temperaturas entre el lado iluminado y el no iluminado en la región C1, alcanza ≈ 4.5 K. En el anillo B, con alta profundidad óptica, la región B5 alcanza hasta 16 K de ΔT . Para el anillo C, ΔT está entre los 3 K y los 8 K. La división de Cassini, CD1, también muestra una $\Delta T = 9$ K.

De las Figuras 9.3a y 9.3b, se tiene que la diferencia de temperaturas entre el lado iluminado y el no iluminado en la región C1 no varía demasiado, en relación con los ángulos de -22° -23° alcanzando

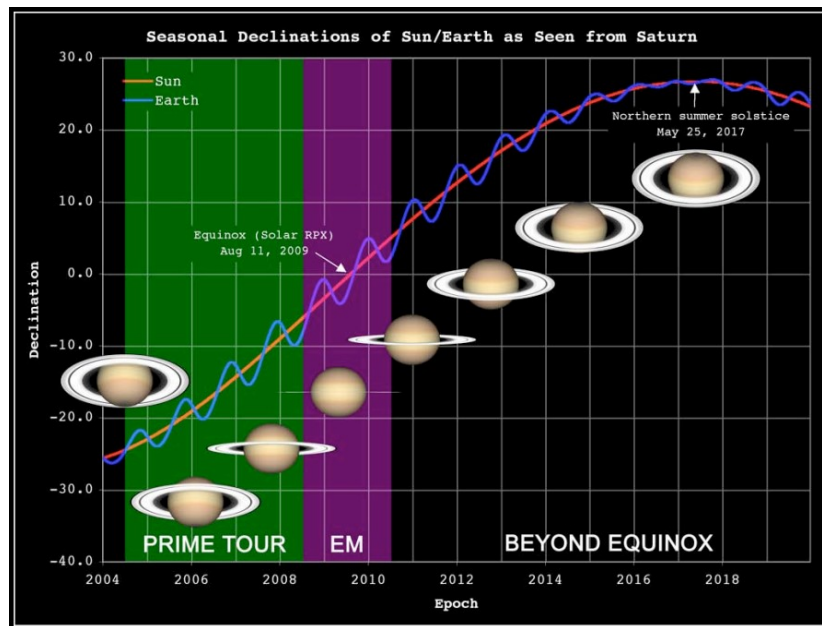
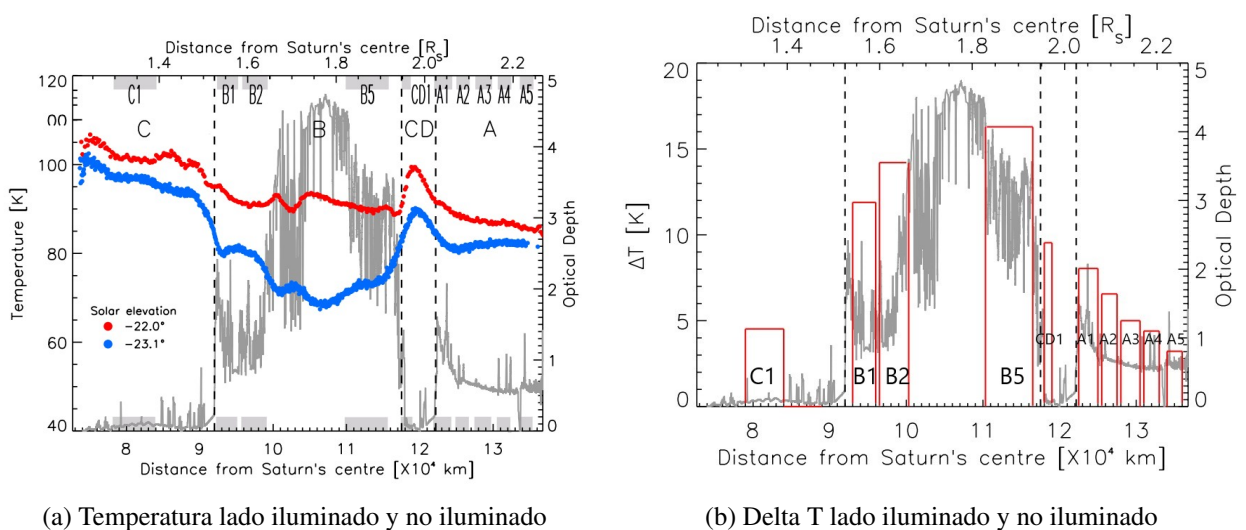


Figura 9.1: El Sol ilumina el sur de Saturno y no ilumina el norte en la parte inferior izquierda, en la parte superior derecha el Sol ilumina el norte y no ilumina el sur. NASA/JPL/California Institute Technology.



(a) Temperatura lado iluminado y no iluminado

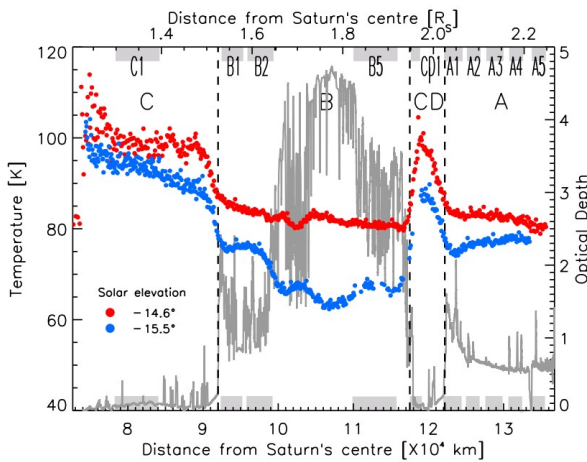
(b) Delta T lado iluminado y no iluminado

Figura 9.2: Temperaturas de los anillos de Saturno del lado iluminado y el no iluminado para ángulos, $B' = -22^\circ$ y $B' = -23^\circ$, respectivamente. Este par de gráficas muestran la máxima diferencia de temperaturas entre ambos lados dado que en esta geometría reciben la máxima cantidad de energía.

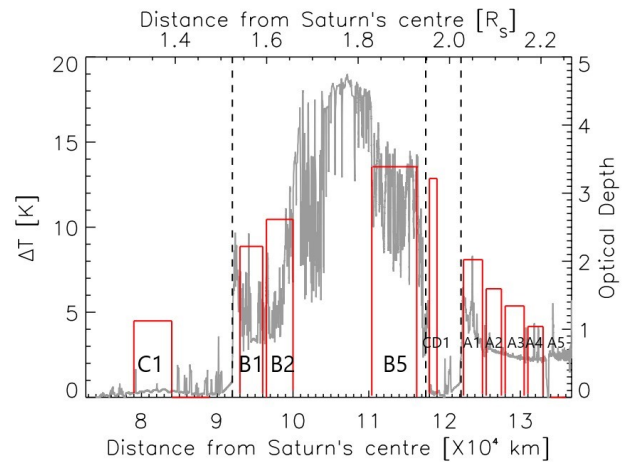
≈ 4.5 K, aunque si hay una disminución en la temperatura del lado iluminado y no iluminado. Es notable el hecho de que la máxima ΔT se presenta tanto en el anillo B (13.5 K) como en la división de Cassinin (13 K), pero con valores contrastantes en la profundidad óptica respectiva. En el anillo A ΔT

Cuadro 9.1: De los datos de la Figura 9.2 se obtiene la siguiente tabla. Se presentan datos para las regiones B4 y B5, pero no se consideran por ser regiones con una profundidad óptica extremadamente variable.

Region	Distancia R_S	T_{Lit}	T_{Unlit}	ΔT [K]
A5	[2.22, 2.25]	85.5	82.3	3.1
A4	[2.17, 2.20]	86.8	82.4	4.4
A3	[2.12, 2.16]	87.1	82.1	5.0
A2	[2.08, 2.11]	87.9	81.3	6.6
A1	[2.03, 2.07]	90.2	82.1	8.1
CD1	[1.95, 1.97]	95.6	86.0	9.6
B5	[1.83, 1.93]	90.0	73.8	16.2
B4	[1.74, 1.82]	92.2	69.4	22.8
B3	[1.67, 1.73]	91.4	71.0	20.4
B2	[1.60, 1.66]	91.3	77.1	14.3
B1	[1.54, 1.59]	92.6	80.7	11.9
C1	[1.31, 1.39]	101.2	96.7	4.5



(a) Temperatura lado iluminado y no iluminado



(b) Delta T lado iluminado y no iluminado

Figura 9.3: Temperaturas de los anillos de Saturno del lado iluminado y el no iluminado para ángulos, $B' = -14.6^\circ$ y $B' = -15.5^\circ$, respectivamente.

se ubica entre los 4 K y los 8 K.

De las Figuras 9.4a y 9.4b, se tiene que la diferencia de temperaturas entre el lado iluminado y el no iluminado en la región C1 alcanza $\approx 2.6K$. En el anillo B ΔT está entre los 3 K y 5 K. En la división

Cuadro 9.2: De los datos de la Figura 9.3 se obtiene la siguiente tabla:

Region	Distancia R_S	$T_{Lit} = -14^\circ$	$T_{Unlit} = -15.5^\circ$	ΔT [K]
A5	[2.22, 2.25]	80.4	sin datos	—
A4	[2.17, 2.20]	82.0	77.9	4.1
A3	[2.12, 2.16]	82.7	77.4	5.3
A2	[2.08, 2.11]	83.2	76.8	6.4
A1	[2.03, 2.07]	83.6	75.5	8.1
CD1	[1.95, 1.97]	92.1	80.0	12.
B5	[1.83, 1.93]	80.8	67.3	13.5
B4	[1.74, 1.82]	82.1	48.3	33.8
B3	[1.67, 1.73]	81.7	50.1	30.6
B2	[1.60, 1.66]	83.0	72.5	10.5
B1	[1.54, 1.59]	84.9	76.0	8.9
C1	[1.31, 1.39]	98.40	93.9	4.5

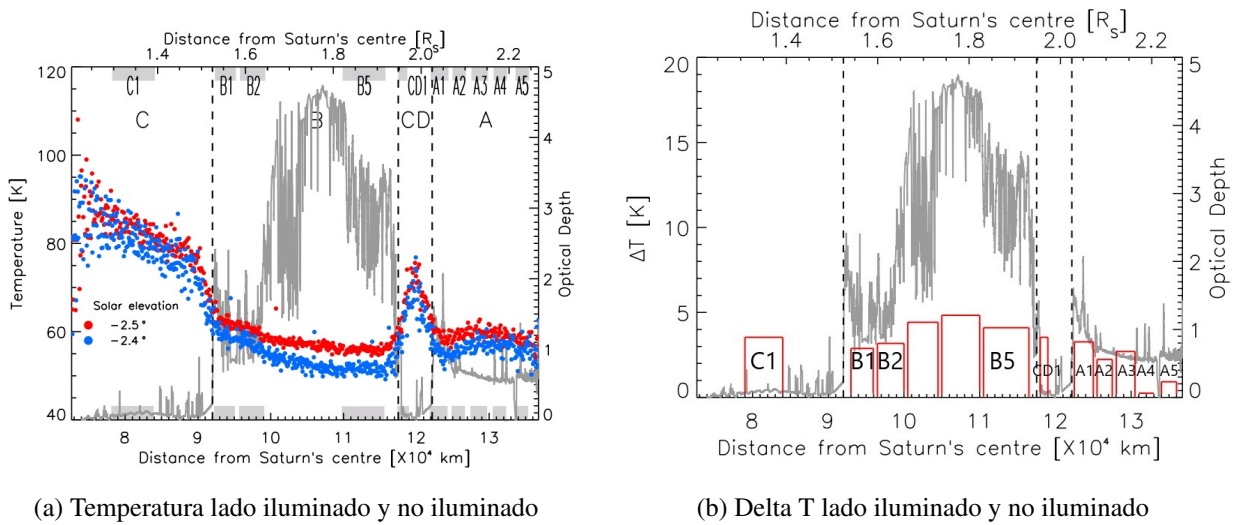


Figura 9.4: Temperaturas de los anillos de Saturno del lado iluminado y el no iluminado para ángulos, $B' = -2.5^\circ$ y $B' = -2.4^\circ$, respectivamente.

de Cassini $\Delta T \approx 3.5$ K. En el anillo A, ΔT se ubica entre 1 K y 3 K.

De las Figuras 9.5a y 9.5b, se tiene que la diferencia de temperaturas entre el lado iluminado y el no iluminado en la región C1 alcanza, nuevamente ≈ 4.5 K. En el anillo B, ΔT está entre los 1.6 K y 2.4 K. En la división de Cassini, $\Delta T \approx 3.5$ K. En el anillo A, ΔT se ubica entre 3 K y 4 K.

Cuadro 9.3: De los datos de la Figura 9.4 se obtiene la siguiente tabla:

Region	Distancia R_S	$T_{Lit} = -2.5^\circ$	$T_{Unlit} = -2.4^\circ$	$\Delta T [K]$
A5	[2.22, 2.25]	58.1	57.1	1.0
A4	[2.17, 2.20]	59.2	59.0	0.2
A3	[2.12, 2.16]	59.9	57.2	2.7
A2	[2.08, 2.11]	59.6	57.4	2.2
A1	[2.03, 2.07]	59.2	55.9	3.3
CD1	[1.95, 1.97]	64.7	61.2	3.5
B5	[1.83, 1.93]	56.0	51.9	4.1
B4	[1.74, 1.82]	56.7	51.8	4.9
B3	[1.67, 1.73]	57.8	53.4	4.4
B2	[1.60, 1.66]	59.5	56.3	3.2
B1	[1.54, 1.59]	59.1	55.5	3.6
C1	[1.31, 1.39]	83.3	80.7	2.6

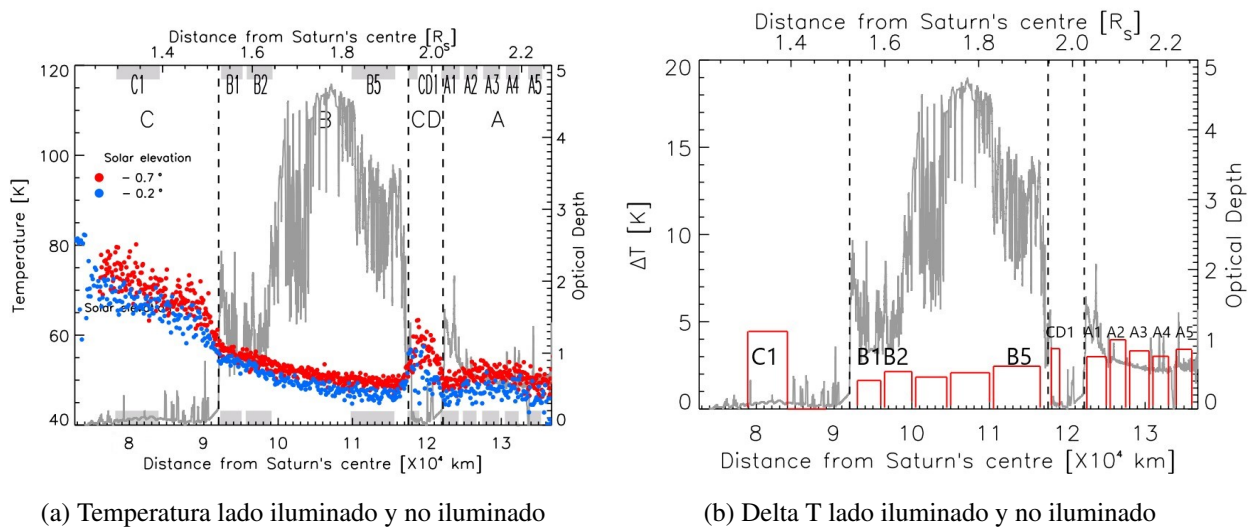


Figura 9.5: Temperaturas de los anillos de Saturno del lado iluminado y el no iluminado para ángulos, $B' = -0.7^\circ$ y $B' = -0.2^\circ$, respectivamente.

De forma general se puede apreciar que conforme el valor del ángulo de elevación solar va aumentando de -22° hasta -0.7° en el lado iluminado y de -23.1° hasta -0.2° en el lado no iluminado, tanto las temperaturas de cada anillo como sus las diferencias de temperatura también decrecen:

Asimismo, si el ángulo de elevación solar se acerca al equinoccio de Saturno, las ΔT máxima y mínima

Cuadro 9.4: De los datos de la Figura 9.5a y de la Figura 9.5b, se obtiene la siguiente tabla:

<i>Region</i>	<i>Distancia</i> R_S	$B'_{LIT} = -0.7^\circ$	$B'_{UNLIT} = -0.2^\circ$	$\Delta T [K]$
A5	[2.22, 2.25]	49.4	45.9	3.5
A4	[2.17, 2.20]	51.0	48.0	3.0
A3	[2.12, 2.16]	51.5	48.2	3.3
A2	[2.08, 2.11]	51.4	47.5	3.9
A1	[2.03, 2.07]	49.7	46.7	3.0
CD1	[1.95, 1.97]	89.4	86.0	3.4
B5	[1.83, 1.93]	49.5	47.0	2.5
B4	[1.74, 1.82]	50.4	48.3	2.1
B3	[1.67, 1.73]	51.9	50.1	1.8
B2	[1.60, 1.66]	53.6	51.5	2.1
B1	[1.54, 1.59]	55.5	53.9	1.6
C1	[1.31, 1.39]	71.7	67.2	4.5

Cuadro 9.5: Variaciones máximas y mínimas de temperatura y su región correspondiente

<i>Tabla</i>	$B'_{Lit}/B'_{Unlit} [^\circ]$	$\Delta T_{max} [K]$	$\Delta T_{min} [K]$	<i>Region</i> $\Delta T_{max}/\Delta T_{min}$
9.1	-22.0/-23.1	16.2	3.1	B5 / A5
9.2	-14.6/-15.5	13.5	4.1	B5 / A4
9.3	-2.5/-2.4	4.1	0.2	B5 / A4
9.4	-0.7/-0.2	4.5	1.6	C1 / B1

para los cuatro pares de ángulos del lado iluminado y no iluminado tienden a decrecer. La mayor ΔT se da en regiones de alta profundidad óptica (B5 y B4); la menor ΔT se presenta en regiones de baja profundidad óptica (A5 y A4).

La excepción a este comportamiento es para ángulos muy cercanos a cero, prácticamente en el equinoccio. En este punto se debe considerar que los anillos están prácticamente de canto y, por tal hecho, la energía que reciben del Sol es mínima, podemos visualizarlo como un eclipsamiento máximo de las partículas de los anillos. Las sombras que proyectan las partículas de los anillos son las más largas posibles y, por tanto, el efecto de eclipsamiento adquiere relevancia en las regiones muy densas o de elevada profundidad óptica.

En regiones con baja profundidad óptica las partículas que se ubican arriba o abajo del plano del anillo reciben energía solar sin contratiempos, al ser pocas el eclipsamiento entre ellas es prácticamente nulo.

A continuación se resaltan algunos aspectos particulares en cada anillo:

9.1. Anillo C

La máxima diferencia entre ambos lados en este anillo está entre 5 y 7 K y disminuye hasta casi cero en el equinoccio y es el anillo que tiene una menor diferencia de temperatura entre ambos lados de los anillos principales.

9.2. Anillo B

La mayor diferencia entre el lado iluminado y no iluminado se da en este anillo (≈ 20 K) y, en particular, en la región B3 que tiene la profundidad óptica más alta (4.52).

En el lado iluminado la temperatura cae de ≈ 90 K a ≈ 55 K en el lado no iluminado la temperatura disminuye de ≈ 80 K a ≈ 53 K para las regiones B1 y B2.

La región B5 tiene una profundidad óptica mayor, en relación a B1 y B2, lo cual provoca que la temperatura del lado no iluminado sea menor, en tanto la temperatura del lado iluminado es muy próxima a la temperatura del lado iluminado de B1 y B2.

Cuando el ángulo B' es muy cercano a cero, se tiene que las temperaturas son ≈ 55 K en el lado iluminado y ≈ 53 K en el lado no iluminado para B1, y de ≈ 50 K en el lado iluminado y ≈ 48 K en el lado no iluminado para B4 y B5. Estos valores hacen que ΔT sea la más pequeña ≈ 2 K.

9.3. Anillo CD

En el caso del anillo CD, la característica forma de V invertida se mantiene en tanto que la inclinación de los anillos se acerca al equinoccio. Los valores de temperatura descienden de ≈ 100 K a ≈ 50 K. Dada su baja profundidad óptica y la existencia de partículas por arriba y abajo del plano del anillo la temperatura del lado iluminado se mantiene ligeramente mayor que la del lado no iluminado. Muy cercano al equinoccio, $\Delta T \approx 3$ K. El comportamiento es similar al del anillo C.

9.4. Anillo A

Para el anillo A, la diferencia máxima de temperaturas entre el lado iluminado y no iluminado está entre los 3 K y los 8 K en las diferentes regiones (Figuras 9.2b y 9.3b). Cerca del equinoccio, la temperatura en cada lado se mantiene casi constante: alrededor de 50 K para el lado iluminado y 47 K, para el lado no iluminado, en consecuencia la ΔT es ≈ 3 K, en todo el anillo.

Capítulo 10

Variaciones con respecto al ángulo de fase

Antes de la nave *Cassini*, las observaciones de los anillos de Saturno, se efectuaban desde la Tierra y en un rango limitado de ángulos de fase (Esposito, 2014). El ángulo de fase α , es el ángulo subtendido por los vectores que unen el centro de la región (*footprint*) de estudio con el observador (en nuestro caso la nave *Cassini*) y con el Sol y su rango es de $[0^\circ, 180^\circ]$. Para nosotros, la región de estudio es el centro del campo de visión del instrumento de observación.

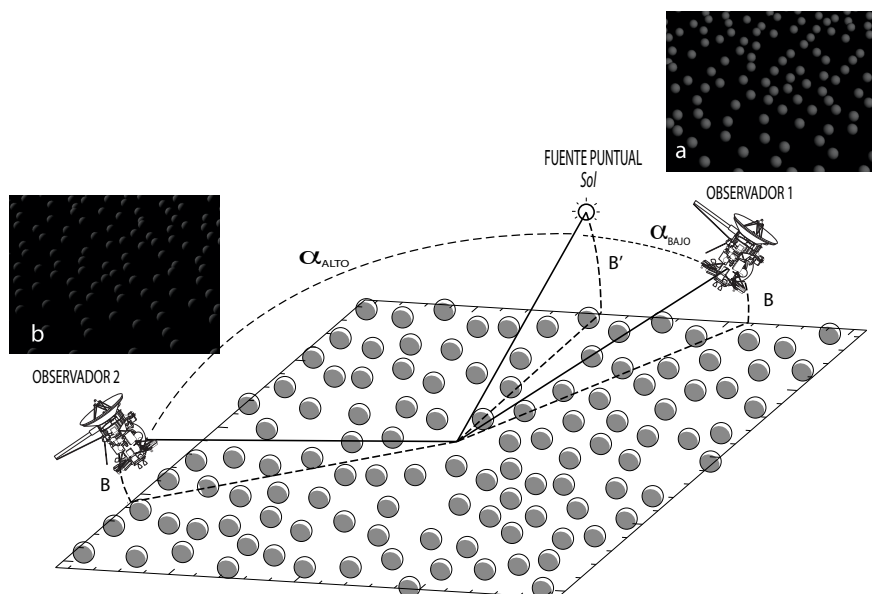


Figura 10.1: Iluminación de las partículas de los anillos a dos ángulos de fase diferentes, uno bajo y el otro alto. El área iluminada de la parte visible de las partículas difiere notablemente debido a la posición de la nave *Cassini*. Imagen adaptada de Flandes *et al.* (2010)

El conjunto de valores de brillo o temperatura de brillo con respecto al ángulo de fase se conocen como curvas de fase y estas son útiles para evaluar las propiedades de una superficie planetaria o de

los anillos.

Un fenómeno interesante en las curvas de fase (Temperatura vs ángulo de fase) de superficies planetarias es el llamado *efecto de oposición*, el cual se refiere a un aumento exponencial en la temperatura de brillo en $\alpha = 0^\circ$ o ángulos de fase muy pequeños. El término *oposición* se aplica en el sentido astronómico, es decir, con respecto al observador, la zona de observación donde se observa el aumento de brillo está en la posición opuesta con respecto a la fuente luminosa o el Sol, lo que resulta en una superposición de la dispersión coherente (*Coherent-Backscattering*, CBOE) y de la ausencia de sombras (*Shadow Hiding*, SHOE) por la perspectiva del observador, (Hapke *et al.*, 1993), (Nelson *et al.*, 1998), Kaasaleinen *et al.*(2001), (Poulet y Cuzzi, 2002), (Nelson *et al.*, 2006), (Hapke *et al.*, 2006), (French *et al.*, 2007).

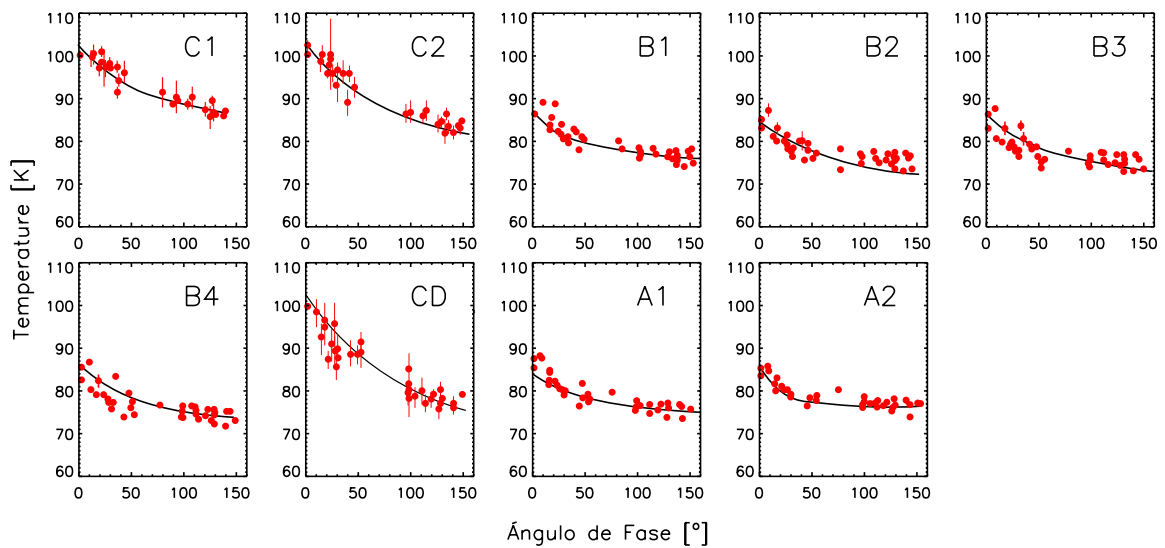


Figura 10.2: Temperatura *versus* ángulo de fase, (T vs α), para las regiones de estudio. Se usan los mismo datos y ajustes (Ec. 10.6 y Tabla 10.1) reportados por Fátima Juárez, (2017).

Las curvas de fase obtenidas para varias superficies en el sistema solar, en particular para asteroides y la Luna, también presentan los aumentos por oposición, comúnmente interpretado como el resultado de la ausencia de sombras desde la perspectiva del observador y relacionado con la topografía de la superficie, (Lebofsky y Rieke, 1986) (Mendell y Lebofsky, 1982). En el caso de Saturno el aumento de brillo también estaría relacionado tanto por el regolito en una sola partícula, como por el sombreado interpartícula (o proyecciones de sombras entre partículas vecinas), aunque finalmente este último juega un papel relevante en las curvas de fase.

La transición de un régimen relativamente lineal a uno exponencial en las curvas de fase de los anillos A y B ocurre a ángulos de fase de 30° a 40° . En el anillo C y la División de Cassini la pendiente exponencial es más pronunciada y para ángulos claramente mayores a 30° .

Cada escaneo se puede describir geoméricamente por el conjunto $\Omega = \{r_s, B, B', \psi, L_f, d_\odot, d_{sp}\}$, los

cuales son respectivamente: la distancia radial de la huella al centro de Saturno, elevación de la nave espacial y elevación solar por arriba del plano del anillo, la separación angular entre el plano de incidencia de iluminación solar y el plano de observación, el tiempo local del anillo y la distancia a Saturno del Sol y la nave. El ángulo de fase α resulta de una combinación de B, B' y ψ , de tal forma:

$$\cos(\alpha) = \sin(B)\sin(B') + \cos(B)\cos(B')\cos(\psi) \quad (10.1)$$

Estudios preliminares de sensibilidad de las mediciones del CIRS, fueron elaborados por Leyrat *et al.* (2008) y por Altobelli *et al.* (2007). Se demostró que las variaciones del ángulo de fase tienen una influencia crucial para los análisis térmicos de los anillos. En sus datos, se considera solo el canal del lejano infrarrojo (F4), porque esta longitud de onda contiene el pico en la emisión del cuerpo negro para las partículas del anillo y asegura una baja señal de ruido, además de que la incertidumbre asociada es pequeña. Los datos se obtuvieron en el hemisferio sur iluminado por el Sol, con una elevación solar de -23° a -10° en tanto que para varias horas locales, la elevación de la nave abarcó un rango de 0° a 55° .

Los datos utilizados se encuentran entre las 6 am y las 8 pm, en hora local o ángulo azimutal ($180^\circ/12$ por cada hora), para asegurarse que las partículas alcancen una temperatura de equilibrio después de salir de la zona de sombreado.

Una simple descripción analítica, sin suposiciones físicas y que solo pretende describir la morfología de las curvas de fase esta dada por la siguiente ecuación:

$$T(\alpha) = T_p \exp\left(-\frac{\alpha}{2\omega}\right) + S\alpha + T_b \quad (10.2)$$

Donde S representa la pendiente de la parte lineal de la curva, la amplitud de la curva está dada:

$$A = \frac{T_p + T_b}{T_b} \quad (10.3)$$

la mitad del ancho, a la mitad del máximo de la parte exponencial es:

$$HWHM = 2\omega \ln(2) \quad (10.4)$$

T_b y T_p son parámetros con unidades de temperatura y están relacionados con la temperatura a fase de 0° por $T_0 = T_p + T_b$.

La Ecuación 10.2 es la más adecuada para la obtención de las curvas de fase.

Los parámetros para cada región de los anillos se resumen en la Tabla 10.1.

Cuadro 10.1: Parámetros utilizados para la obtención de las curvas de fase para cada región de los anillos principales.

Región	R_S	A	HWHM(deg)	$T_o[K]$	T_p	T_b	S(K deg-1)	ω
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	86.0	8.52	77.48	-0.03	19.98
B3	1.740-1.823	1.11	27.7	86.0	8.52	77.48	-0.03	19.98
B4	1.823-1.906	1.11	27.7	86.0	8.52	77.48	-0.03	19.98
C1	1.309-1.392	1.17	32.5	103.0	14.97	88.03	-0.05	23.44
C2	1.392-1.475	1.17	32.5	103.0	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

Es interesante notar, que usando la función de sombreado de Hapke $B(h, \alpha)$, (Hapke *et al.*, 1993), da excelentes resultados para el anillo A y el anillo B. En una aproximación burda, suponiendo que la distribución espacial de flujo térmico sigue una función de sombreado estadístico tal que:

$$I(\alpha) = p(\alpha)I(\pi)B(h, \alpha) \quad (10.5)$$

donde $I(\alpha)$ es el flujo térmico y $p(\alpha)$ es la función de fase intrínseca del material del anillo en el rango de la longitud de onda térmica. Suponiendo que la probabilidad de emisión de un fotón en cualquier elemento de superficie es independiente del ángulo de fase $p(\alpha) = 1$, ignorando los fotones infrarrojos dispersados por mutuo calentamiento. La ecuación 10.5, se puede reescribir en términos de la temperatura, usando $I = \sigma T^4$, σ es la constante de Stefan-Boltzmann:

$$T(\alpha) = T_\pi \left[1 + \left(\frac{B_0}{1 + \frac{1}{h} \tan \frac{\alpha}{2}} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (10.6)$$

Con $0 < B_0 < 1$, y $0 < h < 1$, T_π es la temperatura a 180° y la temperatura de fase a 0° es $T_0 = T_\pi (1 + B_0)^{\frac{1}{4}}$, los parámetros h y B_0 están parametrizados con el ancho y la amplitud del levantamiento de la curva, respectivamente.

Una importante ventaja del formalismo de Hapke es que el levantamiento de oposición h se puede relacionar directamente con el factor volumétrico de llenado Φ . Para una población de partículas esféricas monodispersas tenemos $h \approx -\frac{3}{8} \ln(1 - \Phi)$, Hapke *et al.* (1993).

Es importante resaltar que las variaciones de temperatura con respecto al ángulo de fase, no son variaciones físicas de temperatura en el tiempo en el sentido estricto, sino variaciones debidas a la geometría de observación de cuerpos (partículas) que tienen caras a distinta temperatura por estar iluminadas sólo parcialmente. Por tanto, cuando hablamos de disminución de temperatura en las siguientes secciones, lo hacemos sólo para denotar el cambio de temperatura en la observación.

10.1. Anillo C

Para la región C1, conforme la nave se desplaza de $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha = 30^\circ$, la temperatura desciende ≈ 4 K (de 100 K a 96 K). De $\alpha = 30^\circ$ a $\alpha = 50^\circ$, la disminución de temperatura va de 96 K a 92 K. De 50° a 80° no hay datos y de los 80° hasta 150° la temperatura baja de 92 K a 87 K.

Para C2 la disminución de temperatura se da de la siguiente manera: De 0° a 30° , la temperatura desciende de 102 K a 95 K. De 30° a 50° se tiene una dispersión en los datos, la temperatura se ubica en un intervalo (90 K - 95 K). De 50° a 90° no hay datos y de los 90° hasta 150° la temperatura baja de 87 K a 82 K.

10.2. Anillo B

Las regiones de este anillo son ópticamente densas o de alta profundidad óptica, razón por la cual la temperatura en $\alpha = 0^\circ$ es más baja en comparación con los demás anillos (≈ 85 K). En los primeros treinta grados disminuye hasta casi los 80 K e incluso menos (≈ 75 K) para la región B4. Para ángulos mayores y hasta 150° la temperatura desciende suavemente alcanzando los 75 K.

10.3. Anillo CD

Es una región con baja profundidad óptica, lo cual hace que la temperatura en $\alpha = 0^\circ$, sea de 102 K y disminuya hasta los 95 K en $\alpha = 30^\circ$. En el intervalo de $[30^\circ, 50^\circ]$ se observa que la temperatura disminuye, aún con la dispersión que los datos presentan. De 50° a 90° no hay datos y de los 90° hasta 150° la temperatura desciende de 83 K a 76 K.

10.4. Anillo A

En $\alpha = 0^\circ$, la temperatura se ubica alrededor de los 85 K y disminuye en los primeros treinta grados hasta ≈ 78 K. A partir de este ángulo y hasta los 150° , la caída de temperatura es muy suave (casi constante en la región A2) alcanzando ≈ 76 K.

Capítulo 11

Variaciones de temperatura con respecto al terminador

El *terminador* es la línea imaginaria que separa la zona iluminada y la zona oscura de un cuerpo celeste o que define la frontera entre el lado noche y el lado día. En nuestro caso llamaremos terminador a la frontera de la sombra proyectada sobre los anillos (como se ve en la Figura 11.1). A diferencia de otras mediciones de la temperatura de los anillos, la medición a través del terminador nos da información directa de la respuesta al cambio de temperatura de sus partículas en un intervalo relativamente corto de tiempo (\approx horas). A esta respuesta le llamamos inercia térmica.

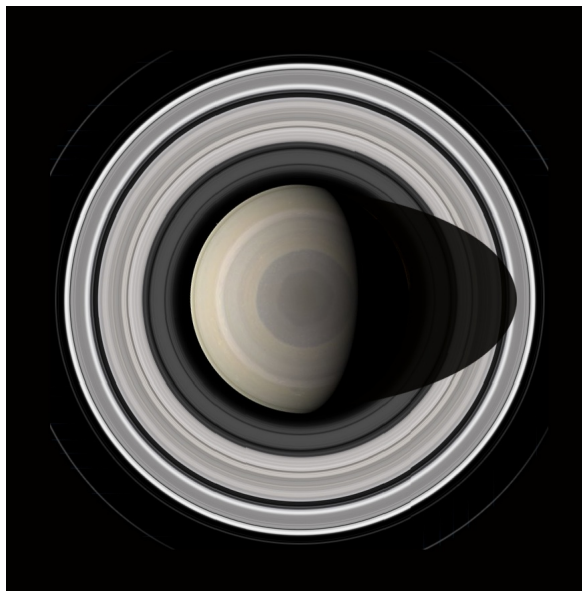


Figura 11.1: Iluminación del planeta Saturno y de sus anillos por parte del Sol. El terminador de la sombra de Saturno sobre los anillos es clara. Al entrar en el terminador la temperatura de las partículas desciende. Imagen NASA/JPL

Dada una hora local, la temperatura de los anillos varía significativamente de una observación a otra, esto es, varía con el ángulo de fase α , el ángulo de elevación de la nave B y el ángulo de elevación solar B' . Para los escaneos azimutales, las variaciones de la temperatura son:

En el anillo A, la variación va de 75 a 90 K, en el anillo B la variación va de 63 a 95 K y en el anillo C la variación va de 75 a 100 K.

Como se discutió en los capítulos anteriores, debemos considerar que la temperatura varía con el ángulo de elevación solar y con el ángulo de fase, tanto para el lado iluminado como no iluminado. Estas variaciones están implícitas en los datos que analizamos a continuación (escaneos azimutales) con la siguiente geometría:

- Ángulo de fase: $2.5^\circ \leq \alpha \leq 151.6^\circ$.
- Ángulo de elevación de la nave: $-58.6^\circ \leq B \leq 64.5^\circ$.
- Ángulo de elevación solar: $-22.5^\circ \leq B' \leq -14.2^\circ$.
- Para el lado iluminado: hora local $\Psi = 8 - 12$ h, con FP1.
- Para el lado no iluminado: hora local $\Psi = 20 - 2$ h.

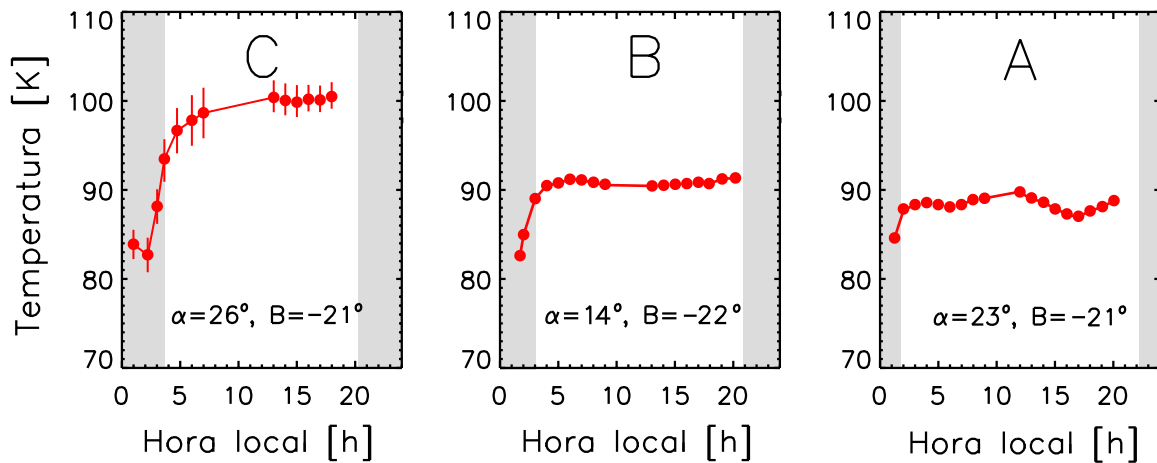


Figura 11.2: En estas gráficas se presenta la variación de temperatura con la *hora local*, conforme las partículas salen de la sombra su temperatura disminuye, al acercarse al final de la sombra las partículas aumentan su temperatura, al salir su temperatura es casi constante. Las franjas grises verticales son de diferente grosor debido a la distancia radial de cada anillo: el anillo C, el más cercano, recibe mayor sombra en comparación con el anillo A.

En la Figura 11.2 se muestran datos de escaneos de los anillos A, B y C, a través del terminador (similares a los escaneos azimutales que se representan en la figura 6.3) a los ángulos de fase más pequeños disponibles ($\alpha > 14^\circ$) y la mayor elevación posible de la nave (B), para resaltar la mayor variación de temperatura al cruzar el terminador, el ángulo de elevación solar es prácticamente el mismo que el de elevación de la nave B . Los valores tanto de α se han promediado en intervalos de una hora. Las zonas grises representan la ubicación aproximada de la sombra en cada anillo.

La energía solar es la fuente más importante para los anillos y la máxima temperatura de los anillos se logra cuando se tiene la máxima iluminación solar. Esto sucede sí se tiene la elevación solar máxima. Para un observador, esto se aprecia cuando el ángulo de fase es $< 30^\circ$. Por lo anterior, para analizar la variación de temperatura de las partículas (ver Figura 11.2) al cruzar el terminador, usaremos observaciones (scans azimutales) que tengan $B' > -20^\circ$ y $\alpha < 30^\circ$.

Debe también tomarse en cuenta que los anillos rotan junto con el planeta en 10h 33m, por lo que los cambios de temperatura que se observan en la Figura 11.2 se dan en cuestión de horas a diferencia de las variaciones de temperatura con la elevación solar que suceden en años. El planeta, junto con los anillos, rotan positivamente o en contra de las manecillas del reloj (desde el punto de vista de un observador colocado sobre el eje de rotación al norte el planeta), significa que, con respecto a la sombra, las partículas se mueven a favor de las manecillas del reloj y, por tanto, entran en la sombra entre las 21h y las 22h y salen de la sombra entre las 2h y 3h dependiendo de la región del anillo.

11.1. Anillo C:

Antes de entrar en la sombra del planeta, la temperatura es $\approx 100\text{ K}$ (puntos en el centro). Suponemos que al entrar en la sombra (lado derecho de la gráfica) la temperatura de las partículas de este anillo descende hasta los 82 K (como se ve en el lado izquierdo).

Poco antes de cruzar el terminador, las partículas se empiezan a calentar y, en cuestión de un par de horas, su temperatura sube hasta los 95 K nuevamente.

En los datos, las barras de error son grandes ya que en este anillo se presenta una gran dispersión en los datos de temperatura debido a la cercanía con el planeta.

La máxima variación de temperatura es de 20 K, ya sea a la entrada o salida de sombra ($\Psi = 3h$). Este fenómeno se ha observado desde tierra para el anillos B y C. Esto implica un caída en la temperatura en el hemisferio visible de las partículas, sí suponemos una monocapa de partículas de igual tamaño y rotando lento.

Ferrari y Leyrat (2006), demostraron que la temperatura en el anillo C podría presentar tal caída antes de que las partículas crucen el terminador, ya que la radiación combinada del Sol y Saturno iluminan el mismo hemisferio.

Cuando la tasa de rotación es pequeña comparada con la frecuencia orbital, los hemisferios de las partículas que ve el observador a ángulos α bajos, se exponen a la radiación solar mucho tiempo y su temperatura se eleva.

11.2. Anillo B

Antes de entrar a la sombra del planeta (datos centro-derecha) la temperatura de las partículas de los anillos tienen un valor casi constante ≈ 90 K. Se puede suponer que al entrar en la sombra la temperatura de las partículas desciende hasta los 82 K. Al salir (parte izquierda) se calientan hasta los ≈ 90 K en cuestión de pocas horas.

11.3. Anillo A

Antes de cruzar el terminador (datos centro-derecha), la temperatura de las partículas del anillo A se mantiene casi constante (≈ 88 K). Al entrar a la sombra, la temperatura disminuye hasta 84 K (parte izquierda). Esta temperatura, se incrementa en un tiempo de poco más de una hora al salir de la sombra o cruzar el terminador.

Capítulo 12

Discusión

Los sistemas anulares en el Universo son recurrentes y se dan a diferentes escalas, por ejemplo, los anillos del asteroide Cariclo, los anillos planetarios en general y el cinturón de asteroides, Un caso extremo es el recién descubierto anillo de estrellas que rodea el bulbo de la Vía Láctea, Wylie *et al.* (2022).

El sistema de anillos de Saturno resume todos los efectos y mecanismos que rigen la dinámica de los sistemas anulares en general, por lo que su estudio es relevante y lo que podamos aprender de este sistema se puede trasladar y/o extrapolar a otros sistemas.

En esta tesis se ha optado por extraer propiedades físicas de los anillos a partir de gradientes de temperatura. Cabe mencionar que hemos usado el término "Variaciones de temperatura" de forma genérica, indicando en algunos casos enfriamiento o calentamiento de las partículas de los anillos en un intervalo dado de tiempo, que puede ser de horas (como en el caso de las variaciones con respecto al terminator) o de meses o años (como en el caso de las variaciones de temperatura con respecto a B' o entre las caras de los anillos). En otros casos, estas *variaciones* son sólo diferencias de temperatura entre regiones (como en el caso de las variaciones con respecto a la profundidad óptica) o diferencias de temperatura entre partes distintas de una misma región o de un mismo conjunto de partículas que al estar sólo parcialmente iluminadas, la observación de la temperatura muestra cambios al cambiar la perspectiva (como las variaciones con α). En todos los casos, el patrón de sombras juega un papel importante, pero en estos últimos dos casos, el patrón es esencialmente el mismo.

A continuación resaltamos algunos de propiedades de los anillos que pueden derivarse de las variaciones de temperatura que analizamos.

12.1. Estructura

La estructura más general de los anillos principales se puede estudiar con los datos de profundidad óptica como se puede ver en las Figuras: 6.4, 7.1 a 7.4, 8.1 y 9.2 a 9.5. En estos datos se pueden definir las fronteras de cada región y la distribución general de masa. Sin embargo, estos datos nos dan

una perspectiva normal y, por tanto, radial y no explican directamente la distribución vertical de las partículas.

Con ayuda de modelos como los expuestos en el Capítulo 5 a través de los datos de temperatura se tiene una idea más clara de esta estructura, excepto en el caso de las regiones más densas como B3 y B4 y partes de los anillos División de Cassini y c. Las Figuras 5.3 a 5.5 con el modelo híbrido de Flandes *et al.* (2021) son un ejemplo de lo anterior. La desventaja es que suponen partículas esféricas con superficies lisas lo cual no es realista, aunque en promedio, el resultado sea satisfactorio. Igualmente, se puede extraer información de la estructura vertical del estudio de las variaciones de temperatura entre el lado iluminado y oscuro (ver Figuras 5.2 a 5.5). Estas diferencias de temperatura indican estructuras más simples en el anillo C y más complejas en los anillos A y B (en particular, en las regiones más densas), y partes del anillo CD.

De las gráficas 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4 se puede observar que hay una relación inversa entre la temperatura y la profundidad óptica. Este hecho es evidente para los anillos C y División de Cassini, de lo cual se infiere que estos anillos son poco densos, en ambos anillos la temperatura máxima se alcanza cuando la profundidad óptica tiene su valor mínimo. Lo cual indica, que las partículas en estos anillos están muy separadas entre sí, y el eclipsamiento entre partículas es casi nulo excepto para $B' < 10^\circ$, por lo anterior, las partículas absorben más eficientemente la energía que incide sobre ellas. Para los anillos A y B el planteamiento es inverso: si la profundidad óptica es elevada la temperatura es menor, lo cual implica que son anillos densos, donde las partículas están muy cercanas y el eclipsamiento entre ellas es notable.

De las Figuras 6.4 y 9.2 a 9.5, se puede inferir que existe un mecanismo de transporte de energía que hace que la temperatura del lado no iluminado se mantenga cercana, pero siempre inferior, a la temperatura del lado iluminado, es decir, hay un flujo de energía del lado iluminado al no iluminado.

En el anillo B (alta profundidad óptica) es claro que ese mecanismo no es tan eficiente, ya que la diferencia de temperaturas entre ambos lados es notable. De lo cual se puede reafirmar dos hechos: la elevada densidad de partículas y el eclipsamiento entre las mismas.

De las dos estrategias de observación utilizadas por el CIRS, a saber, los escaneos radiales y los escaneos azimutales. Los primeros, se enfocaron a estudiar la variación de las propiedades térmicas de los anillos, con la distancia radial, la profundidad óptica τ y una hora local Ψ fija.

En la Figura 8.2 se observa que cuando la elevación solar es relativamente grande ($B' > 8^\circ$), en los anillos poco densos, C y División de Cassini, la temperatura se mantiene casi constante en el intervalo ($8^\circ, 23^\circ$) lo cual implica poco o nulo eclipsamiento y consecuentemente pocos choques de partículas. En contraste, para $B' < 8^\circ$ se observa una caída *más rápida* en la temperatura indicando, como en los atardeceres, largas sombras que pueden proyectarse en las partículas vecinas a pesar de la gran separación entre ellas. En contraste la variación de temperatura en los anillos densos no presenta cambios abruptos en los diferentes ángulos de elevación solar.

Las mayores variaciones de temperatura en los anillos principales se deben primordialmente al ángulo de elevación solar. Las variaciones observadas con el ángulo de fase y los ángulos de elevación de la nave y de hora local son efectos secundarios y son, en su mayoría, sólo cambios aparentes de temperatura atribuibles sólo a la perspectiva de observación. Por ejemplo, sí el ángulo de fase disminuye, la

temperatura aumenta, lo cual a su vez está ligado a la variación del ángulo de hora local.

De las Figuras 9.2, 9.3, 9.4 y 9.5, se observa que mientras mayor sean tanto el ángulo de elevación solar B' como la profundidad óptica τ_{dyn} , mayor es la diferencia de temperatura entre el lado iluminado y no iluminado.

Sí el ángulo de elevación solar B' tiende a cero (equinoccio), la temperatura desciende hasta alrededor de los 70K en anillo C y entre los 45 K y 60 K para el resto de anillos, siendo la diferencia entre el lado iluminado y no iluminado menor a los 5 K como se puede ver en la Tabla 9.5.

En general, las mediciones muestran que para ángulos de fase pequeños, la temperatura observada aumenta en las partículas situadas entre las 6:00 y 18:00 h, este intervalo corresponde al lado opuesto de la sombra del planeta. Se han registrado variaciones de temperatura de 20 K cuando las partículas cruzan la sombra de Saturno.

Cuando las partículas llegan a su temperatura mínima justo antes de salir de la sombra, el contraste de la temperatura en el anillo C desaparece a ángulos α bajos y altos, de lo cual se sigue que la temperatura por un instante no depende del valor del ángulo α , esto implica que muchas partículas tienen superficies isotérmicas, ambos lados reciben igual radiación. La inercia térmica de las partículas es muy baja ya que permite enfriarse a estas durante el tiempo del eclipse.

El cruce periódico de las partículas por la sombra del planeta, dura máximo 3 horas dependiendo de la distancia radial, aunque cuando B' es máximo la sombra del planeta no alcanza a cubrir totalmente al anillo C y, en particular su borde externo, se mantiene iluminado aún en la medianoche de la hora local.

El cruce por la sombra genera variaciones azimutales drásticas, pero los datos de CIRS revelan un comportamiento térmico diferente en cada anillo. La tasa de enfriamiento está controlada por la inercia térmica Γ y depende de las propiedades térmicas del material.

La variación de la temperatura en función del ángulo azimutal u hora local Ψ , presenta una modulación compleja, con fluctuaciones de más de 3 K, las cuales no se pueden atribuir a variaciones en el tamaño de la huella. Las temperaturas más altas se registran a $\Psi \approx 10 - 12$ h, este máximo cambia, sí el ángulo α cambia.

12.2. Dinámica

Lo que muestran los datos de profundidad óptica de la estructura general de los anillos son una consecuencia clara de la dinámica. Podemos considerar esta estructura como un estado de equilibrio dinámico. Los anillos principales y los demás anillos han sido *esculpidos* por las fuerzas gravitacionales ejercidas por Saturno y sus lunas. Los efectos generales que se observan son de marea, ondulatorios y de resonancia que se observan como rasgos de alta o baja densidad de partículas. Un factor secundario, son las lunas embebidas que generan brechas y distorsiones en los anillos.

Un rasgo distintivo son las estelas gravitacionales de los anillos A y B que se muestra en las Figuras 5.4 y 5.5, cuyas estructuras fueron utilizadas para explicar los datos de temperatura de los mismos anillos.

Las *wakes* son estructuras similares a bandas inclinadas que indican que las partículas del anillo están sometidas a fuerzas que hacen que se acumulen, pero que también las destruyen continuamente.

El modelo térmico de Flandes *et al.* (2021) y Flandes y García-Reyes (2021) y los datos de temperatura de CIRS han ayudado a refinar las interpretaciones de las *wakes* de Colwell *et al.* (2018, 2006), Jerousek *et al.* (2016), quienes hacen un análisis detallado de las mediciones a través de ocultaciones estelares hechas por Cassini de las *wakes* en los anillos A y B. En este estudio se estiman los cocientes de la altura entre la anchura de estas estructuras aplanadas (ver Sección 4.3.3). Por ejemplo, para el anillo A este valor va de 0.15 a 0.37, aumentando hacia afuera a través del anillo. La separación entre los *wakes* aumenta con su altura desde un valor bajo en el interior del anillo, menor que la anchura del *wake* hasta mayor a tres veces la anchura del *wake* a un tercio del anillo exterior. La opacidad de los huecos entre los *wakes* también aumenta en la parte externa del anillo. Asimismo, calcularon que la opacidad vertical del anillo A es de un 15 a 30% mayor que la que se había reportado. La simetría en la opacidad en las regiones del anillo es causada principalmente por las aglomeraciones que continuamente son destruidas.

Complementariamente resaltamos que las ondas de densidad y ondas de flexión generadas a partir de las resonancias debidas a la interacción entre las lunas o cuerpos de menor masas y las partículas de los anillos originan la dinámica del anillo. La interacción entre las lunas y los anillos, también generan los llamados *propellers* debido su forma. Estas agrupaciones son temporales y se forman alrededor de pequeñas lunas invisibles, Otro ejemplo, son las ondas de densidad, las cuales son acumulaciones de partículas a cierta distancia del planeta e informalmente se conocen como *straw* debido a su morfología, estas agrupaciones de partículas no poseen un núcleo denso. Los anillos densos A y B, son más dinámicos al compararlos con los anillos C y División de Cassini. El anillo A, es el que presenta la mayor dinámica dada su cercanía al límite de Roche.

12.3. Composición

Hasta el momento, aparte del polvo de los anillos analizado por el instrumento CDA de Cassini, ninguna de las misiones ha recolectado muestras de las *grandes* partículas de los anillos principales. Con las observaciones hechas en el infrarrojo por el espectrómetro CIRS, se infiere que las partículas están hechas de hielo de agua principalmente. Los espectros en el visible y ultravioleta respaldan tal afirmación. Filacchione *et al.* (2014), propone, a partir de datos de CIRS como de VIMS, que las partículas contienen aproximadamente entre 90 – 95% de hielo de agua y entre otros, posiblemente, carbono amorfo o tolines y nano-hematita (óxido de hierro).

Las variaciones de color a los largo de los anillos puede indicar cambios en la composición, debido probablemente al continuo bombardeo del polvo interplanetario o micrometeoroides. La mayor contaminación causada por el material meteorítico se observa en los anillos C y División de Cassini. En los anillos A y B hay poco material alifático lo cual es una evidencia de que son prístinos.

Una herramienta útil son los ajustes a las curvas de temperatura con respecto a la elevación solar discutidos en las Secciones 5.2 y 5.4 y en el Capítulo 8, que permiten obtener una estimación del

albedo de las diferentes regiones de los anillos. De acuerdo a la Figura 5.2, las tres regiones del anillo B (B1, B2 y B5), así como las regiones A1 y A3 tienen albedos altos, lo cual significa que tienen menos contaminantes o su composición es más pura.

Albedos altos implica menos contaminantes (composición más pura), en contraste, los albedos más bajos indican material oscuro o mayor presencia de contaminantes de tipo orgánico o inorgánico, por ejemplo las regiones C1 y CD1.

Los distintos albedos obtenidos con las curvas de temperatura *versus* la elevación solar indican también poca o mucha interacción entre las diferentes partículas de los anillos. Los albedos bajos asociados a superficies oscuras como en el caso del anillo C, indican partículas con poca interacción que corresponden a la baja profundidad óptica y alta contaminación por impacto de micrometeoritos en sus superficies que se renuevan poco o nada y viceversa. La región B5 con el albedo más alto está también asociada a una profundidad óptica alta ($\tau = 3.42$) que implica una región de alta concentración de partículas y por lo mismo de mayor interacción que favorece el reciclamiento de material de las superficies de las partículas.

Complementariamente, las mediciones de temperatura a través del terminador nos pueden dar información directa de la inercia térmica de las partículas de los anillos y, por tanto, de su densidad, capacidad calorífica y conductividad térmica que están directamente relacionados con el tipo de material que compone a las partículas, o de acuerdo a la ecuación Leyrat *et al.* (2008): $\Gamma = (1 - p)(K\rho C_p)^{1/2}$ donde C_p es la capacidad calorífica a presión constante del medio, K , la conductividad térmica, p la porosidad del hielo y ρ la densidad volumétrica del hielo.

Leyrat *et al.* (2008), señala que la inercia térmica de las partículas de los anillos es muy baja ($\Gamma = 5_{-2}^{+18} Jm^{-2}K^{-1}s^{-\frac{1}{2}}$) para el anillo B y ($\Gamma = 5_{-4}^{+12} Jm^{-2}K^{-1}s^{-\frac{1}{2}}$) para el anillo C, lo cual implica un regolito muy poroso. Es importante señalar que este valor es más afín a la inercia térmica del hielo de agua.

Por otra parte, los valores reales del albedo no son conocidos, en su lugar se utilizan aproximaciones a pesar de que hay indicios de que las partículas de los anillos están compuestas principalmente de hielo de agua, pero existe una proporción de impurezas que aún no está bien determinada.

Al utilizar datos a diferentes longitudes de onda se pudo evaluar los modelos térmicos combinando los efectos del albedo, la composición del regolito, el tamaño del grano y las propiedades térmicas con las estructuras anulares. A ángulos de fase elevados se observa un notable aumento en el enrojecimiento del espectro a longitudes de onda visibles y en la banda de hielo de agua. A ángulos de fase bajos, los resultados son ligeras firmas espectrales que corresponden, por ejemplo, a compuestos orgánicos con como CH_2 (metileno). La mayor contaminación causada por meteoritos está en el anillo C y la División de Cassini, en tanto que en los anillos A y B se presentan bajos niveles de material orgánico (hidrocarburos alifáticos), Poulet *et al.* (2002), lo cual implica que estas partículas están en su forma original, es decir, se encuentran como al inicio de la formación de los anillos, lo cual puede arrojar resultados significativos en cuanto a la edad y origen de los anillos.

Capítulo 13

Conclusiones

- En este trabajo, hacemos un reanálisis de algunos de los datos presentados en varios trabajos representativos dedicados al análisis térmico de los anillos principales de Saturno. Sin embargo, también presentamos una revisión bibliográfica de estos y otros diferentes artículos de investigación relevantes para los estudios térmicos de los anillos. Nos concentramos en el análisis de datos tomados con el espectrómetro compuesto infrarrojo, CIRS. Los gradientes están asociados a variables como el ángulo de elevación solar, el ángulo de elevación de la nave, el ángulo de fase, la hora local y la profundidad óptica. Igualmente las mediciones de temperatura entre el lado iluminado (lado sur en este caso) y no iluminado (lado norte en este caso); y transición a través del terminador de la sombra del planeta sobre los anillos. En algunos casos, reanalizamos resultados ya publicados y en otros, se presentan análisis resultado de la presente tesis (p.ej., Cap.9).

Uno de los objetivos es mostrar *El Estado del Arte* de los estudios térmicos de los anillos principales de Saturno.

- La temperatura y la profundidad óptica tienen una relación inversa, lo cual evidencia una variación en la estructura o disposición de las partículas que componen los anillos. Podemos distinguir entre los anillos densos (u ópticamente gruesos) A y B y anillos no densos (u ópticamente delgados) C y División de Cassini. Los anillos densos poseen albedos altos, son más brillantes y aparentemente más prístinos, como consecuencias de la mayor interacción entre sus partículas que remueven el material contenido, producto del impacto de micrometeoroides. En contraste, los anillos C y División de Cassini, presentan bajos valores de albedo, que se mantienen en sus superficies casi intactos porque sus partículas están relativamente aisladas o tienen poco contactos con sus vecinas por estar muy alejadas entre sí.
- Los perfiles de temperatura (por ejemplo, a través del terminador) muestran que las partículas de los anillos se enfrían o se calientan rápidamente, lo cual es consistente con una baja inercia térmica y, por tanto, una composición más afín al hielo de agua. En cualquier caso, las conclusiones que puedan derivarse de este tipo de análisis sólo pueden limitarse a la superficie o al material que recubre a las partículas, por ejemplo, el regolito. La composición interna de las partículas

puede suponerse similar al material de la superficie, es decir hielo de agua, sin considerar los contaminantes (que probablemente son de origen externo) con base a las diferentes teorías de formación de los anillos.

- A mayor ángulo de elevación solar B' , la temperatura observada en los anillos, pues un [area mayor de las partículas es iluminada por la energía solar. Además la temperatura del lado iluminado de los anillos siempre es mayor que la del lado no iluminado considerando ángulos similares de elevación solar y la diferencia es directamente proporcional a la profundidad óptica del anillo.
- Algunas estructuras observadas en los anillos son cambiantes como las debidas a perturbaciones gravitacionales, principalmente por la interacción entre las lunas y las partículas de cada anillo. Por ejemplo, las ondas de densidad, las estelas gravitacionales y los *propellers* o Propelas y otras estructuras. Otras estructuras transitorias se deben a perturbaciones electromagnéticas, como es el caso de los *spokes*, donde se observa levitación electrostática del polvo que esta presente en los anillos, a causa de la interacción entre el campo magnético de Saturno y el viento solar. Varias de estas estructuras transitorias tienen efectos en la temperatura observada y deben cosiderarse en los modelos térmicos de los anillos.

Bibliografía

- Allen, D. A. y Murdock, T. L. (1971). Infrared Photometry of Saturn, Titan, and the Rings. , 14(1):1–2.
- Altobelli, N., Spilker, L., Pilorz, S., Brooks, S., Edgington, S., Wallis, B., y Flasar, M. (2007). C ring fine structures revealed in the thermal infrared. *Icarus*, 191(2):691–701.
- Altobelli, N., Spilker, L. J., Leyrat, C., Pilorz, S., Flandes, A., Morishima, R., y Edgington, S. (2009). Saturn rings thermal phase curves measured by CASSINI-CIRS: a modeling attempt (Invited). En *AGU Fall Meeting Abstracts*, volumen 2009, pp. P54A–02.
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., Snodgrass, C., Roques, F., Vieira-Martins, R., Camargo, J. I. B., Assafin, M., Duffard, R., Jehin, E., Pollock, J., Leiva, R., Emilio, M., Machado, D. I., Colazo, C., Lellouch, E., Skottfelt, J., Gillon, M., Ligier, N., Maquet, L., Benedetti-Rossi, G., Gomes, A. R., Kervella, P., Monteiro, H., Sfair, R., El Moutamid, M., Tancredi, G., Spagnotto, J., Maury, A., Morales, N., Gil-Hutton, R., Roland, S., Ceretta, A., Gu, S. H., Wang, X. B., Harpsøe, K., Rabus, M., Manfroid, J., Opitom, C., Vanzi, L., Mehret, L., Lorenzini, L., Schneiter, E. M., Melia, R., Lecacheux, J., Colas, F., Vachier, F., Widemann, T., Almenares, L., Sandness, R. G., Char, F., Perez, V., Lemos, P., Martinez, N., Jørgensen, U. G., Dominik, M., Roig, F., Reichart, D. E., Lacluyze, A. P., Haislip, J. B., Ivarsen, K. M., Moore, J. P., Frank, N. R., y Lambas, D. G. (2014). A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. *Nature*, 508(7494):72–75.
- Brown, R. H., Baines, K. H., Bellucci, G., Bibring, J. P., Buratti, B. J., Capaccioni, F., Cerroni, P., Clark, R. N., Coradini, A., Cruikshank, D. P., Drossart, P., Formisano, V., Jaumann, R., Langevin, Y., Matson, D. L., McCord, T. B., Mennella, V., Miller, E., Nelson, R. M., Nicholson, P. D., Sicardy, B., y Sotin, C. (2004). The Cassini Visual And Infrared Mapping Spectrometer (Vims) Investigation. *Space Science Review*, 115(1-4):111–168.
- Burns, J. A., Tiscareno, M. S., Spitale, J., Porco, C. C., Cooper, N. J., y Beurle, K. (2009). Giant Propellers Outside the Encke Gap in Saturn’s Rings. En *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, volumen 40 de *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, p. 30.07.
- Colombo, G., Goldreich, P., y Harris, A. W. (1976). Spiral structure as an explanation for the asymmetric brightness of Saturn’s A ring. *Nature*, 264:344.
- Colwell, J. E., Esposito, L. W., y Cooney, J. H. (2018). Particle sizes in Saturn’s rings from UVIS stellar occultations 1. Variations with ring region. *Icarus*, 300:150–166.

- Colwell, J. E., Esposito, L. W., y Sremčević, M. (2006). Self-gravity wakes in Saturn's A ring measured by stellar occultations from Cassini. *Geophysical Research Letters*, 33(7):L07201.
- Colwell, J. E., Esposito, L. W., Sremčević, M., Stewart, G. R., y McClintock, W. E. (2007). Self-gravity wakes and radial structure of Saturn's B ring. *Icarus*, 190(1):127–144.
- Colwell, J. E., Jerousek, R. G., y Esposito, L. W. (2008). The Structure of Sharp Edges in Saturn's Rings. En *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #40*, volumen 40 de *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, p. 29.06.
- Colwell, J. E., Nicholson, P. D., Tiscareno, M. S., Murray, C. D., French, R. G., y Marouf, E. A. (2009). The Structure of Saturn's Rings. En Dougherty, M. K., Esposito, L. W., y Krimigis, S. M., editores, *Saturn from Cassini-Huygens*, p. 375.
- Cuzzi, J., Clark, R., Filacchione, G., French, R., Johnson, R., Marouf, E., y Spilker, L. (2009). Ring Particle Composition and Size Distribution. En Dougherty, M. K., Esposito, L. W., y Krimigis, S. M., editores, *Saturn from Cassini-Huygens*, p. 459.
- Déau, E., Dones, L., Spilker, L., Flandes, A., Baillié, K., Pilorz, S., Showalter, M., El Moutamid, M., y Colwell, J. E. (2019). Cassini CIRS and ISS opposition effects of Saturn's rings - I. C ring narrow or broad surge? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489:2775–2791.
- Doyle, L. R. y Grun, E. (1990). Radiative transfer modeling constraints on the size of the spoke particles in Saturn's rings. *Icarus*, 85(1):168–190.
- Dunham, E., Elliot, J., y Mink, D. (1977). The rings of Uranus. *News Letter of the Astronomical Society of New York*, 1(2):23.
- Esposito, L. (2014). *Planetary Rings, Cambridge Planetary Science Book 15*.
- Ferrari, C. y Leyrat, C. (2006). Thermal emission of spherical spinning ring particles. The standard model. *Astronomy & Astrophysics, Planets and planetary systems*, 447(2):745–760.
- Filacchione, G., Capaccioni, F., Ciarniello, M., Tosi, F., D'Aversa, E., Clark, R. N., Brown, R. N., Buratti, B. J., Cruikshank, D. P., Dalle Ore, C. M., Scipioni, F., y Cerroni, P. (2014). Temperature maps of Saturn's satellites retrieved from Cassini-VIMS observations (Invited). En *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #46*, volumen 46 de *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, p. 502.02.
- Flandes, A. y García-Reyes, Á. M. (2021). Ray tracing particle arrays for the modelling of Saturn's main rings. En *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, volumen 53 de *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, p. 407.01.
- Flandes, A., García-Reyes, Á. M., y Spilker, L. (2021). Ray-tracing thermal modelling of Saturn's main rings. *Icarus*, 354:114063.

- Flandes, A., Spilker, L., Morishima, R., Pilorz, S., Leyrat, C., Altobelli, N., Brooks, S., y Edgington, S. G. (2010). Brightness of Saturn's rings with decreasing solar elevation. *Planetary and Space Science*, 58(13):1758–1765.
- 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., y Taylor, F. W. (2004). Exploring The Saturn System In The Thermal Infrared: The Composite Infrared Spectrometer. *Space Science Reviews*, 115:169–297.
- French, R. G. y Nicholson, P. D. (2000). Saturn's Rings II. Particle Sizes Inferred from Stellar Occultation Data. *Icarus*, 145(2):502–523.
- French, R. G., Verbiscer, A., Salo, H., McGhee, C., y Dones, L. (2007). Saturn's Rings at True Opposition. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119(856):623–642.
- Froidevaux, L. (1981). Saturn's rings: Infrared brightness variation with solar elevation. *Icarus*, 46(1):4–17.
- García-Reyes, A. M. y Flandes, A. (2021). Methods for ray-tracing thermal modelling of saturn's main rings. *MethodsX*, 8:101457.
- Goldreich, P. y Tremaine, S. (1978). The excitation and evolution of density waves. *The Astrophysical Journal*, 222:850–858.
- Goldreich, P. y Tremaine, S. (1980). Disk-satellite interactions. *The Astrophysical Journal*, 241:425–441.
- Grün, E., Gustafson, B. A. S., Dermott, S., y Fechtig, H. (2001). *Interplanetary Dust*.
- Guinan, E. F., Harris, C. C., y Maloney, F. P. (1982). Evidence for a Ring System of Neptune. En *Bulletin of the American Astronomical Society*, volumen 14, p. 658.
- Hamilton, D. P. (2010). Saturn's Largest Ring. En *38th COSPAR Scientific Assembly*, volumen 38, p. 2.
- Hapke, B. W., Nelson, R. M., y Smythe, W. D. (1993). The Opposition Effect of the Moon: The Contribution of Coherent Backscatter. *Science*, 260(5107):509–511.
- Hapke, B. W., Nelson, R. M., Smythe, W. D., y Mannatt, K. (2006). Validity of Regolith Reflectance Models Based on the Radiative Transfer Equation and Coherent Backscatter Theory. En *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #38*, volumen 38 de *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, p. 62.04.

- Hubble, E. (1937). «The Realm of the Nebulae». *Ciel et Terre*, 53:194.
- Ingersoll, A. P., Orton, G. S., Munch, G., Neugebauer, G., y Chase, S. C. (1980). Pioneer Saturn Infrared Radiometer: Preliminary Results. *Science*, 207(4429):439–443.
- Jerousek, R. G., Colwell, J. E., Esposito, L. W., Nicholson, P. D., y Hedman, M. M. (2016). Small particles and self-gravity wakes in Saturn's rings from UVIS and VIMS stellar occultations. *Icarus*, 279:36–50.
- Julian, W. H. y Toomre, A. (1966). Non-Axisymmetric Responses of Differentially Rotating Disks of Stars. *The Astrophysical Journal*, 146:810.
- Kawata, Y. (1983). Infrared brightness temperature of Saturn's rings based on the inhomogeneous multilayer assumption. *Icarus*, 56(3):453–464.
- Kawata, Y. y Irvine, W. M. (1975). Thermal Emission from a Multiple Scattering Model of Saturn's Rings. *Icarus*, 24(4):472–482.
- Kempf, S., Altobelli, N., Schmidt, J., Cuzzi, J. N., Estrada, P. R., y Srama, R. (2023). Micrometeoroid infall onto saturn's rings constrains their age to no more than a few hundred million years. *Science Advances*, 9(19):eadf8537.
- Lebofsky, L. A. y Rieke, G. H. (1986). Infrared observations of planets. In NASA, Washington Reports of Planetary Astronomy, 1985 p 102-103 (SEE N87-12407 03-89).
- Leyrat, C., Spilker, L. J., Altobelli, N., Pilorz, S., y Ferrari, C. (2008). Infrared observations of saturn's rings by cassini circs : Phase angle and local time dependence. *Planetary and Space Science*, 56(1):117–133. Surfaces and Atmospheres of the Outer Planets, their Satellites and Ring Systems: Part III.
- Leyrat, C., Spilker, L. J., Altobelli, N., Pilorz, S., y Ferrari, C. (2008). Infrared observations of Saturn's rings by Cassini CIRS : Phase angle and local time dependence. *Planetary and Space Science*, 56(1):117–133.
- Lin, C. C. y Shu, F. H. (1964). On the Spiral Structure of Disk Galaxies. *Astrophysical Journal*, 140:646.
- Lindblad, B. (1934). On the evolution of a rotating system of material particles, with applications to Saturn's rings, the planetary system and the galaxy. *Monthly Notices of the Royal Society*, 94:231.
- Mendell, W. W. y Lebofsky, L. A. (1982). Lunarlike Thermal Emission and the Standard Asteroid Radiometric Model. En *Bulletin of the American Astronomical Society*, volumen 14, p. 726.
- Michikoshi, S., Fujii, A., Kokubo, E., y Salo, H. (2015). Dynamics of Self-gravity Wakes in Dense Planetary Rings. I. Pitch Angle. *The Astrophysical Journal*, 812(2):151.
- Miner, E. D., Wessen, R. R., y Cuzzi, J. N. (2007). *Planetary Ring Systems*.

- Morishima, R., Salo, H., y Ohtsuki, K. (2009). A multilayer model for thermal infrared emission of Saturn's rings: Basic formulation and implications for Earth-based observations. *Icarus*, 201(2):634–654.
- Murphy, R. E. (1973). Temperatures of Saturn's Rings. *The Astrophysical Journal Letters*, 181:L87.
- Nelson, R. M., Hapke, B., Smythe, W. D., y Spilker, L. J. (1998). Coherent Backscatter in Particulate Materials: Variation of the Circular Polarization Ratio with Particle Size and Phase Angle. En *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #30*, volumen 30 de *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, p. 52.04.
- Nelson, R. M., Hapke, B. W., Brown, R. H., Spilker, L. J., Smythe, W. D., Kamp, L., Boryta, M., Leader, F., Matson, D. L., Nicholson, P. D., y Cassini Vims Rings Team (2006). Cassini VIMS Observes the Opposition Effect in Saturn's Rings. En *36th COSPAR Scientific Assembly*, volumen 36, p. 2129.
- Nolt, I. G., Barrett, E. W., Caldwell, J., Gillett, F. C., Murphy, R. E., Radostitz, J. V., y Tokunaga, A. T. (1980). IR brightness and eclipse cooling of Saturn's rings. , 283(5750):842–843.
- Porco, C. C. (1983). *Voyager observations of Saturn's rings. I. The eccentric rings at 1.29, 1.45, 1.95 and 2.27 Rs. II. The periodic variation of spokes*. Tesis doctoral, California Institute of Technology.
- Poulet, F. y Cuzzi, J. N. (2002). The Composition of Saturn's Rings. *Icarus*, 160(2):350–358.
- Poulet, F., Cuzzi, J. N., y Cruikshank, D. P. (2002). Ring Composition and Origin. En *EGS General Assembly Conference Abstracts*, EGS General Assembly Conference Abstracts, p. 5459.
- Seiß, M., Spahn, F., Sremčević, M., y Salo, H. (2005). Structures induced by small moonlets in Saturn's rings: Implications for the Cassini Mission. *Geophysical Research Letters*, 32(11):L11205.
- Showalter, M. R. y Lissauer, J. J. (2006). The Second Ring-Moon System of Uranus: Discovery and Dynamics. *Science*, 311(5763):973–977.
- Smith, B. A., Soderblom, L. A., Banfield, D., Barnet, C., Basilevsky, A. T., Beebe, R. F., Bollinger, K., Boyce, J. M., Brahic, A., Briggs, G. A., Brown, R. H., Chyba, C., Collins, S. A., Colvin, T., Cook, A. F., Crisp, D., Croft, S. K., Cruikshank, D., Cuzzi, J. N., Danielson, G. E., Davies, M. E., de Jong, E., Dones, L., Godfrey, D., Goguen, J., Grenier, I., Haemmerle, V. R., Hammel, H., Hansen, C. J., Helfenstein, C. P., Howell, C., Hunt, G. E., Ingersoll, A. P., Johnson, T. V., Kargel, J., Kirk, R., Kuehn, D. I., Limaye, S., Masursky, H., McEwen, A., Morrison, D., Owen, T., Owen, W., Pollack, J. B., Porco, C. C., Rages, K., Rogers, P., Rudy, D., Sagan, C., Schwartz, J., Shoemaker, E. M., Showalter, M., Sicardy, B., Simonelli, D., Spencer, J., Sromovsky, L. A., Stoker, C., Strom, R. G., Suomi, V. E., Synott, S. P., Terrile, R. J., Thomas, P., Thompson, W. R., Verbiscer, A., y Veverka, J. (1989). Voyager 2 at Neptune: Imaging Science Results. *Science*, 246(4936):1422–1449.
- Spilker, L. J., Ferrari, C., Altobelli, N., Pilorz, S., y Morishima, R. (2018). *Thermal Properties of Rings and Ring Particles*, pp. 399–433.

- Tiscareno, M. S., Burns, J. A., Hedman, M. M., y Porco, C. C. (2007). The Population of Propellers in Saturn's A Ring. En *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #39*, volumen 39 de *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, p. 10.05.
- Tiscareno, M. S., Burns, J. A., Hedman, M. M., y Porco, C. C. (2008). The Population of Propellers in Saturn's A Ring. *The Astronomical Journal*, 135(3):1083–1091.
- Tiscareno, M. S., Burns, J. A., Hedman, M. M., Porco, C. C., Weiss, J. W., Dones, L., Richardson, D. C., y Murray, C. D. (2006). 100-metre-diameter moonlets in Saturn's A ring from observations of 'propeller' structures. *Nature*, 440(7084):648–650.
- Wylie, S. M., Clarke, J. P., y Gerhard, O. E. (2022). The Milky Way's middle-aged inner ring. *Astronomy & Astrophysics, Planets and planetary systems*, 659:A80.
- Yaroshenko, V. V., Horanyi, M., y Morfill, G. E. (2009). Dust density waves and spoke formation in Saturn. En *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU General Assembly Conference Abstracts, p. 2310.
- Zebker, H. A., Marouf, E. A., y Tyler, G. L. (1985). Saturn's rings - Particle size distributions for thin layer model. *Icarus*, 64:531–548.