

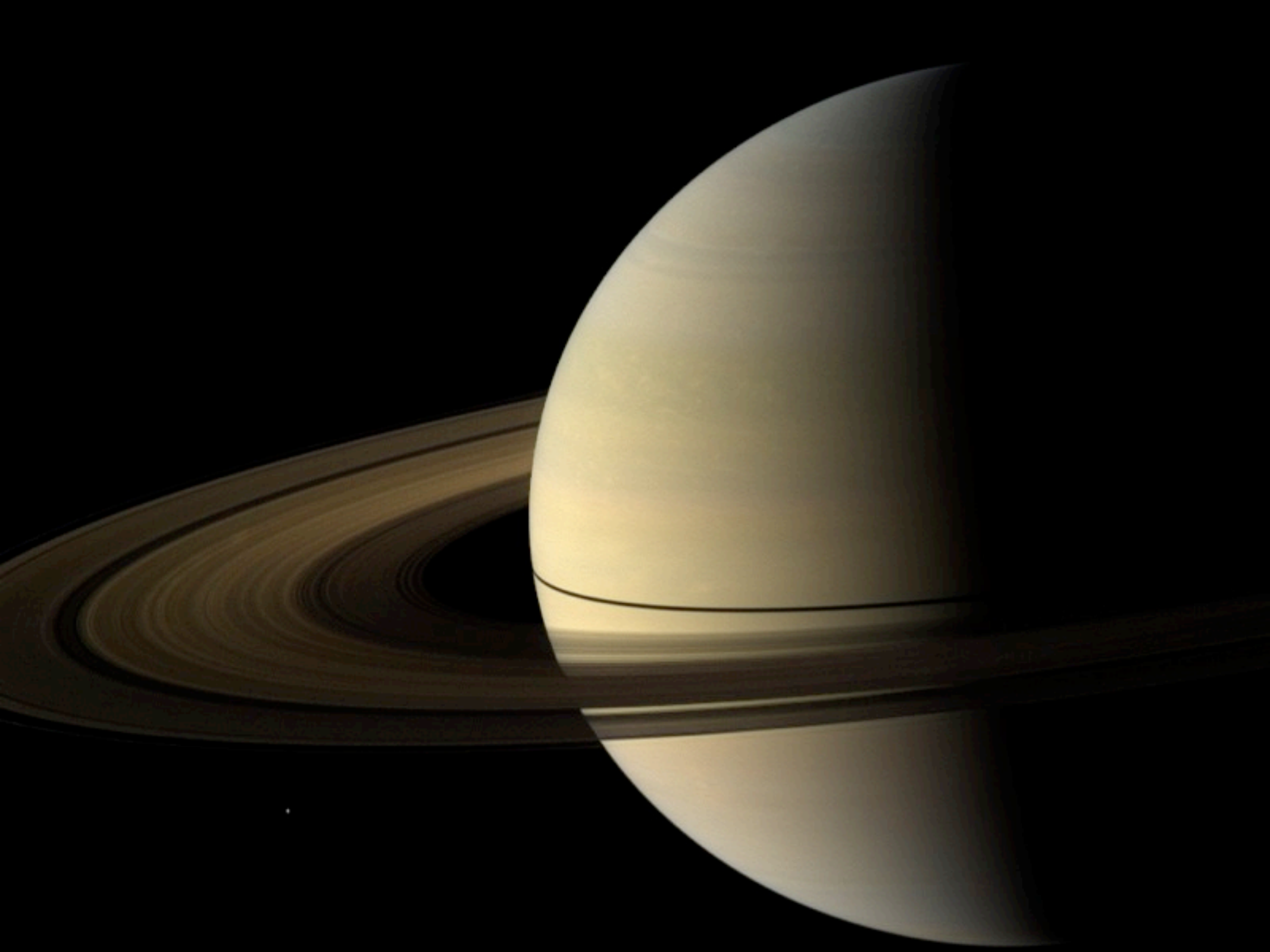


# Geheimnisvoller Saturn Ringe und Monde

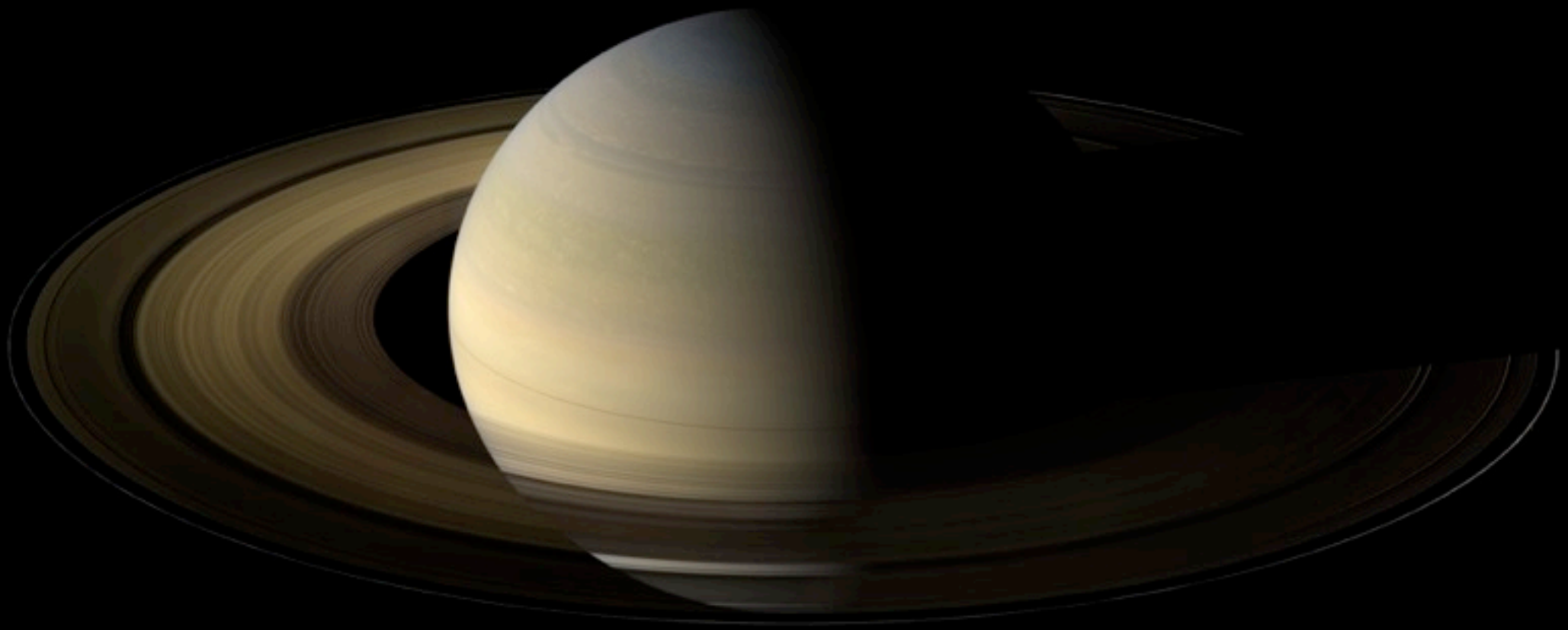
Sascha Kempf

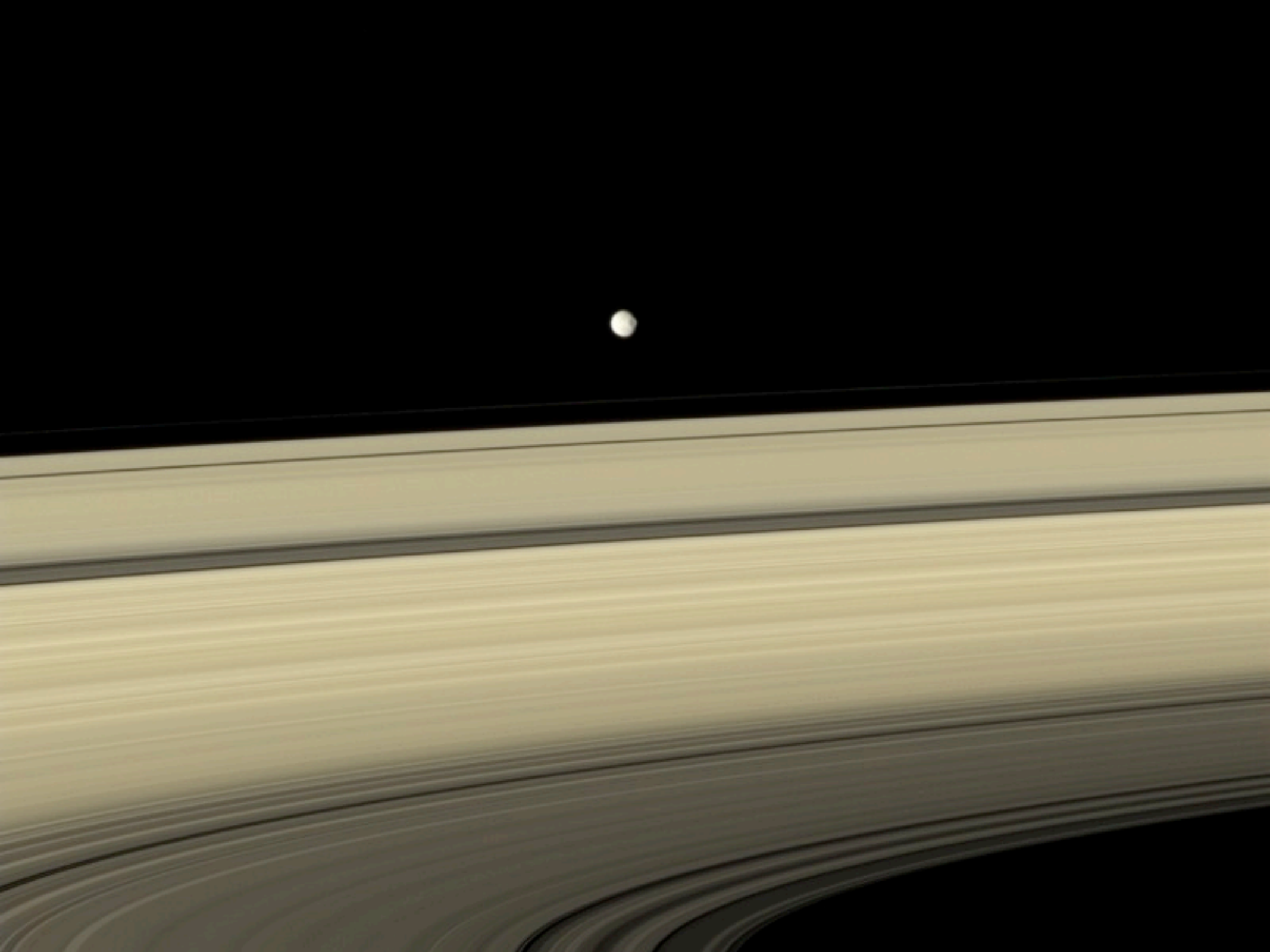
Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg  
und

IGEP, Technische Universität Braunschweig



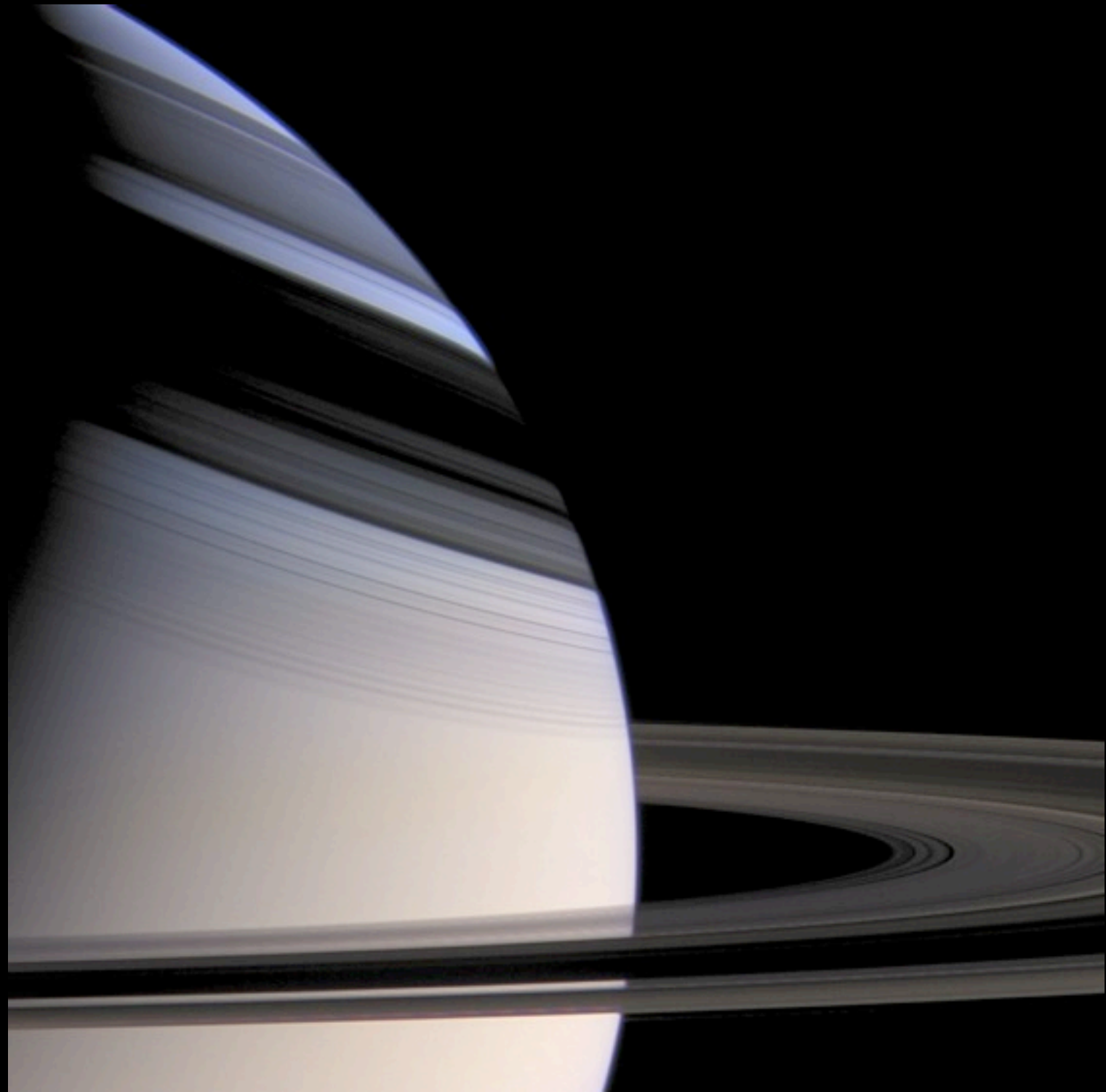


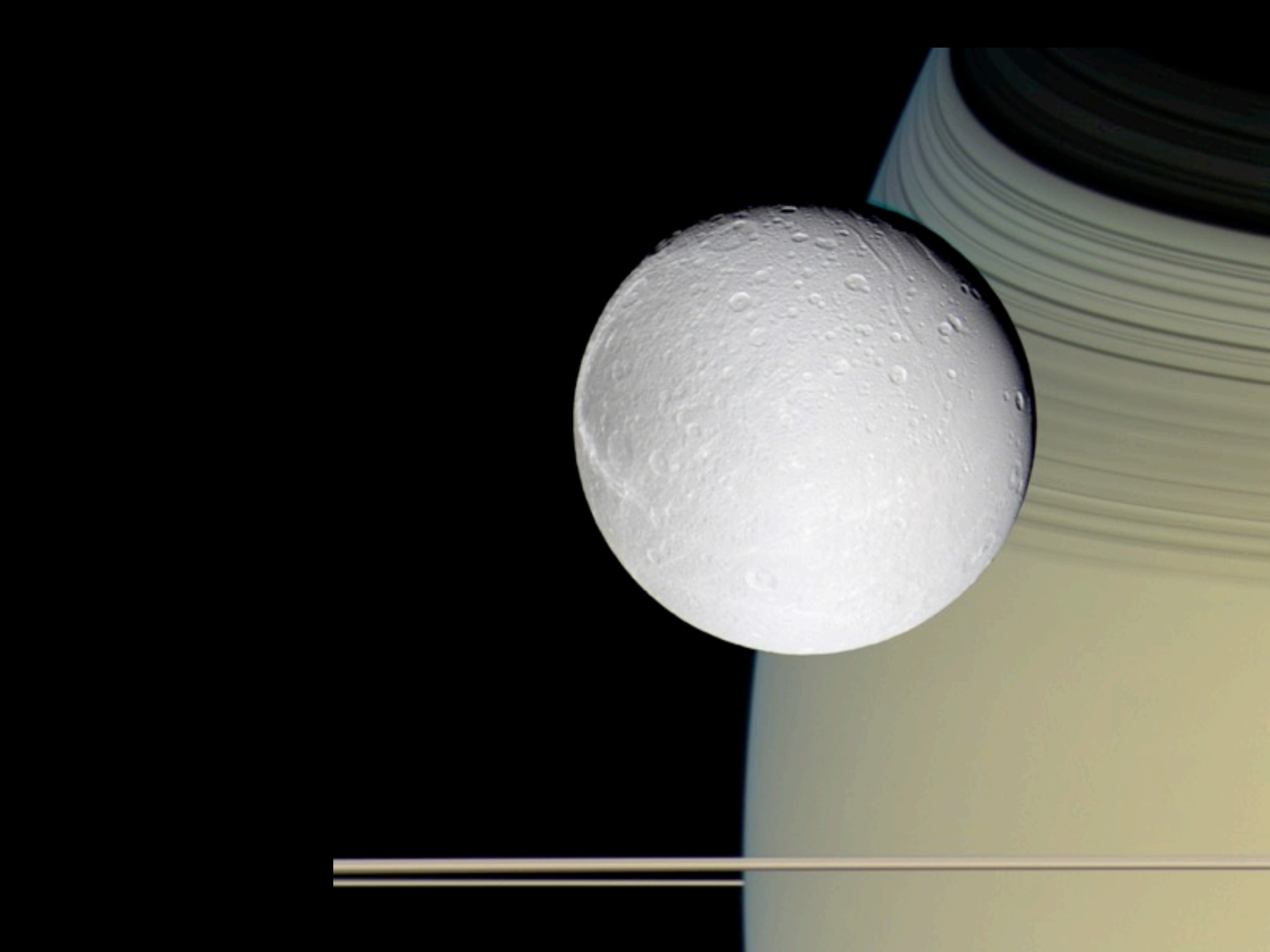






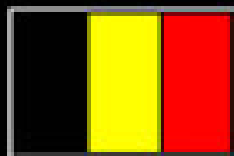




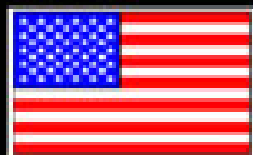


15 Oktober 1997

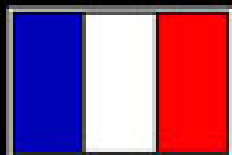




BELGIUM



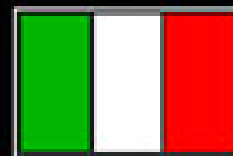
UNITED STATES



FRANCE



GERMANY



ITALY



DENMARK



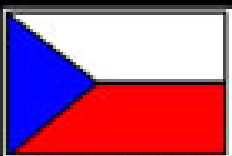
UNITED KINGDOM



SWITZERLAND



NETHERLANDS



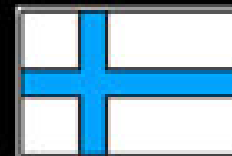
CZECH REPUBLIC



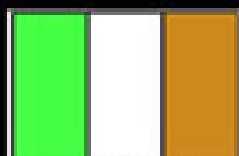
AUSTRIA



SPAIN



FINLAND



IRELAND



HUNGARY



SWEDEN



NORWAY



INTERNATIONAL PARTICIPATION IN

# CASSINI SATURN ORBITER AND HUYGENS TITAN PROBE

# Cassini-Huygens 2007



# Die Namensgeber

Christiaan Huygens  
(1629-1695)



Entdecker der wahren Natur  
der Saturnringe und des  
Mondes Titan

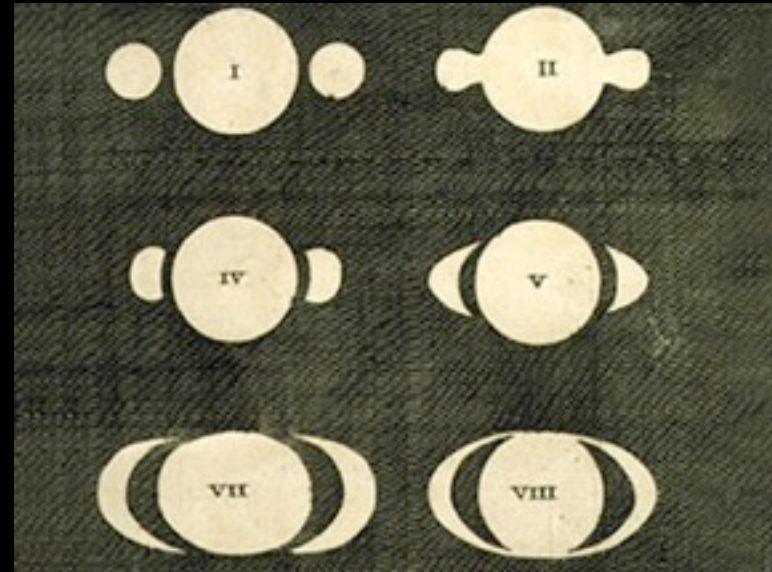


# Saturns Ringe: Galileo Galilei

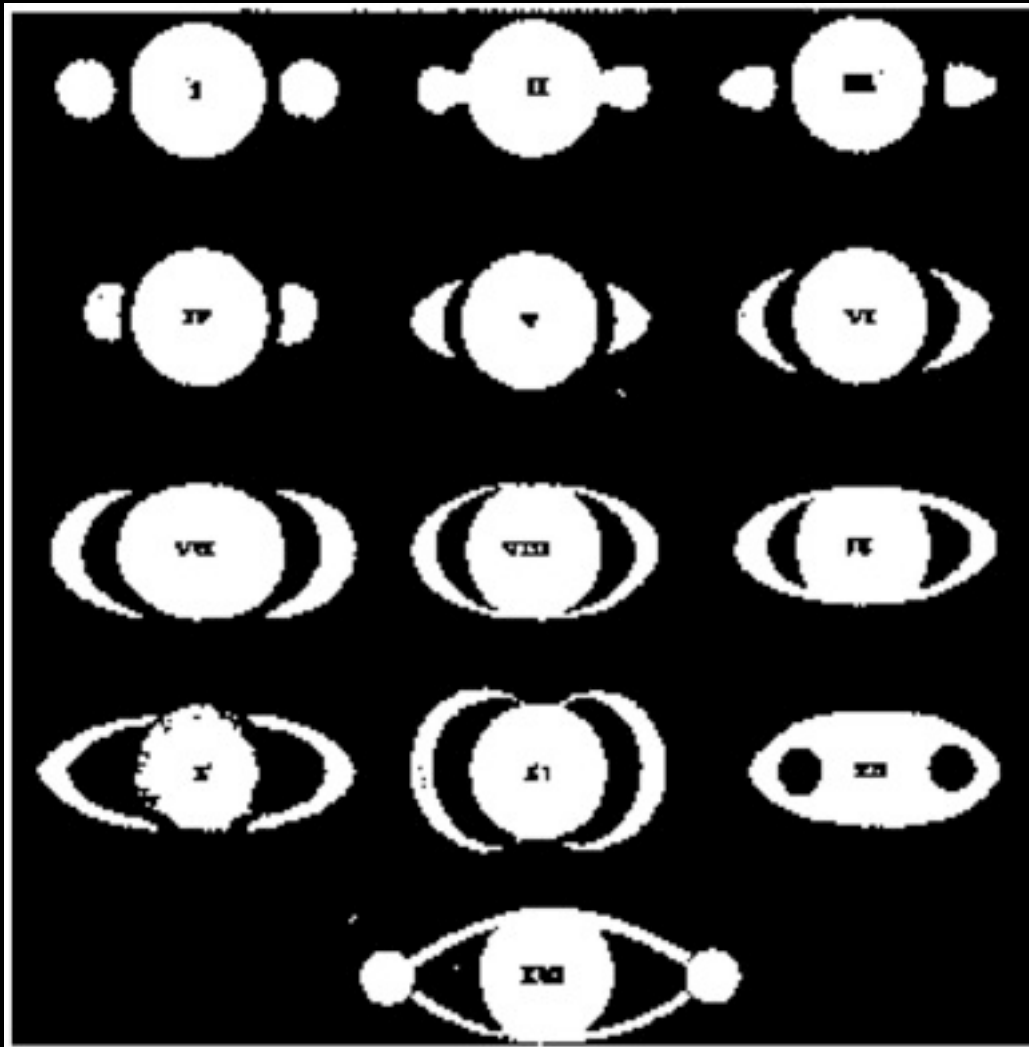


*Siderius Nuncius*: 1610

Ansa (lat. Henkel)

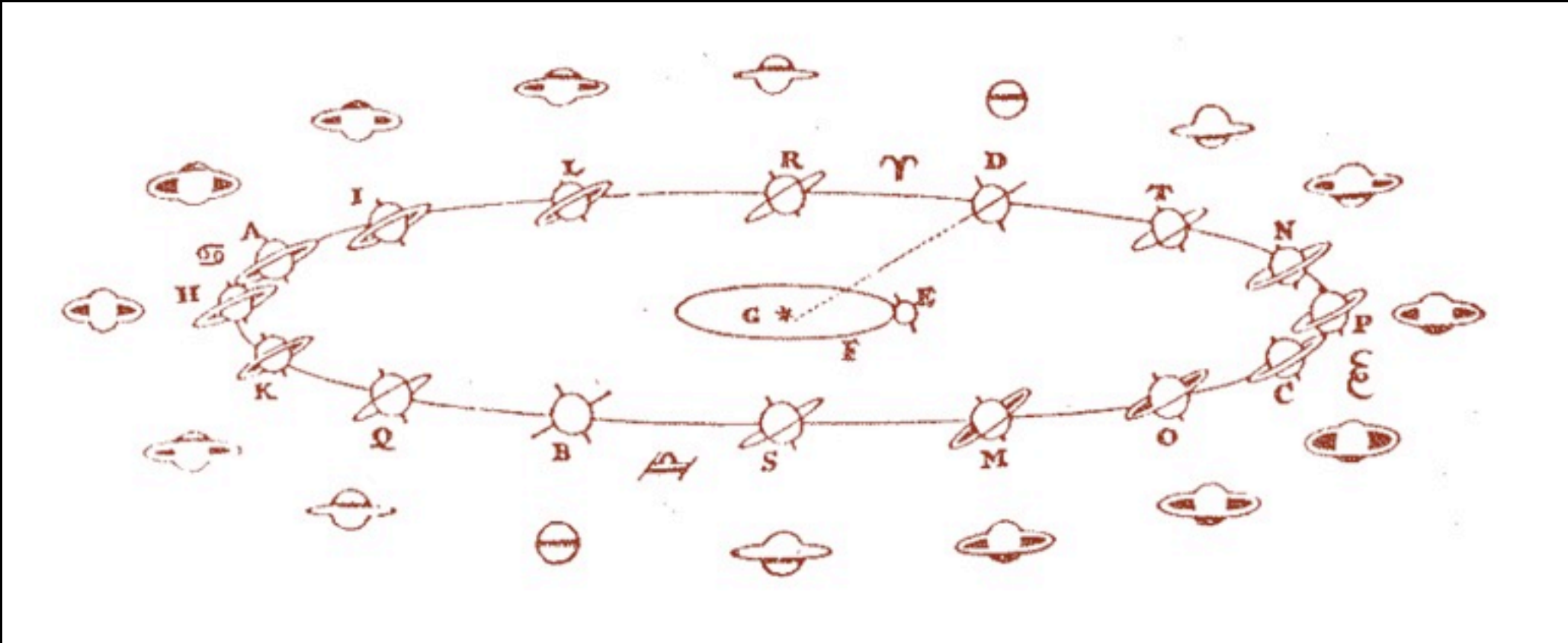


# Saturninterpretationen



- I Galileo 1610
- II Schreiner 1614
- III Riccoli 1614 oder 1643
- IV-VII Hevel
- VIII, IX Riccoli 1648, 1650
- X Divini 1646-48
- XI Fontana 1636
- XII Biancani 1616
- XIII Fontana 1644-45

# Huygens: „*Sytema Saturnium*“



korrekte Erklärung der teleskopischen Beobachtungen  
durch die Neigung der Ringebene zur Erde



# Die Namensgeber

Christiaan Huygens  
(1629-1695)



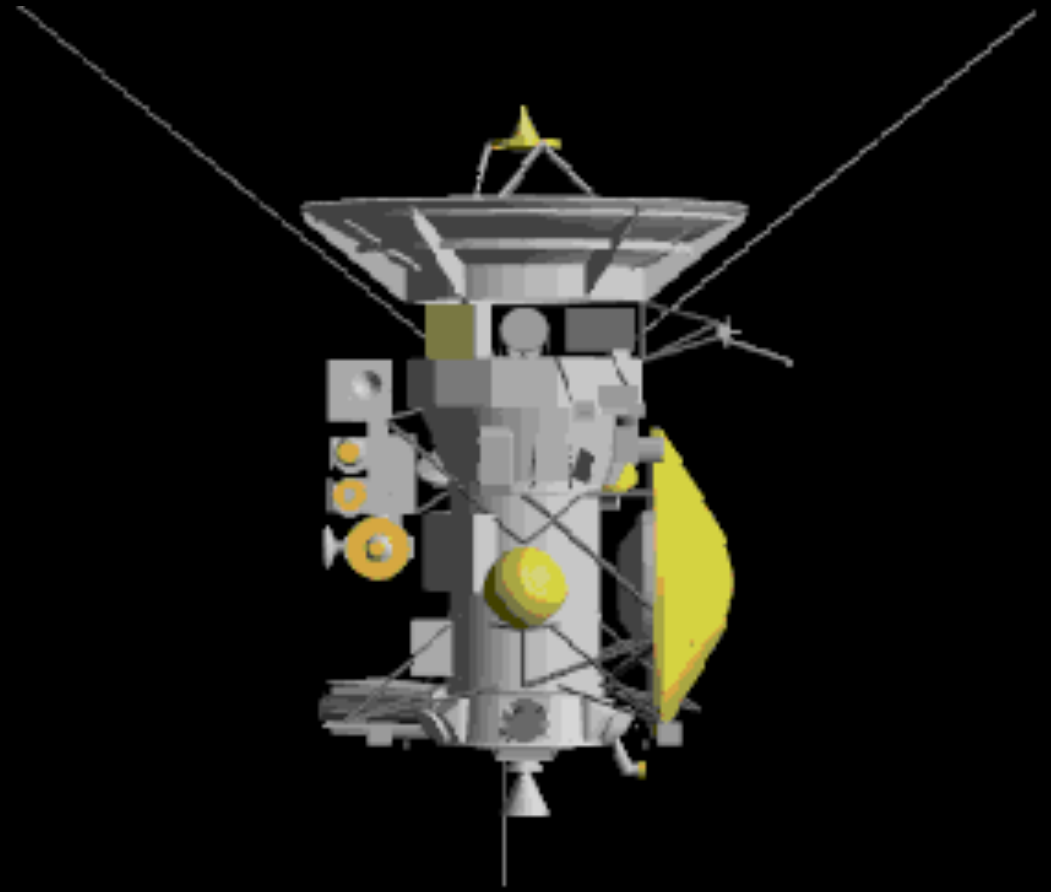
Entdecker der wahren Natur  
der Saturnringe und des  
Mondes Titan

Giovanni Domenico Cassini  
(1625-1712)

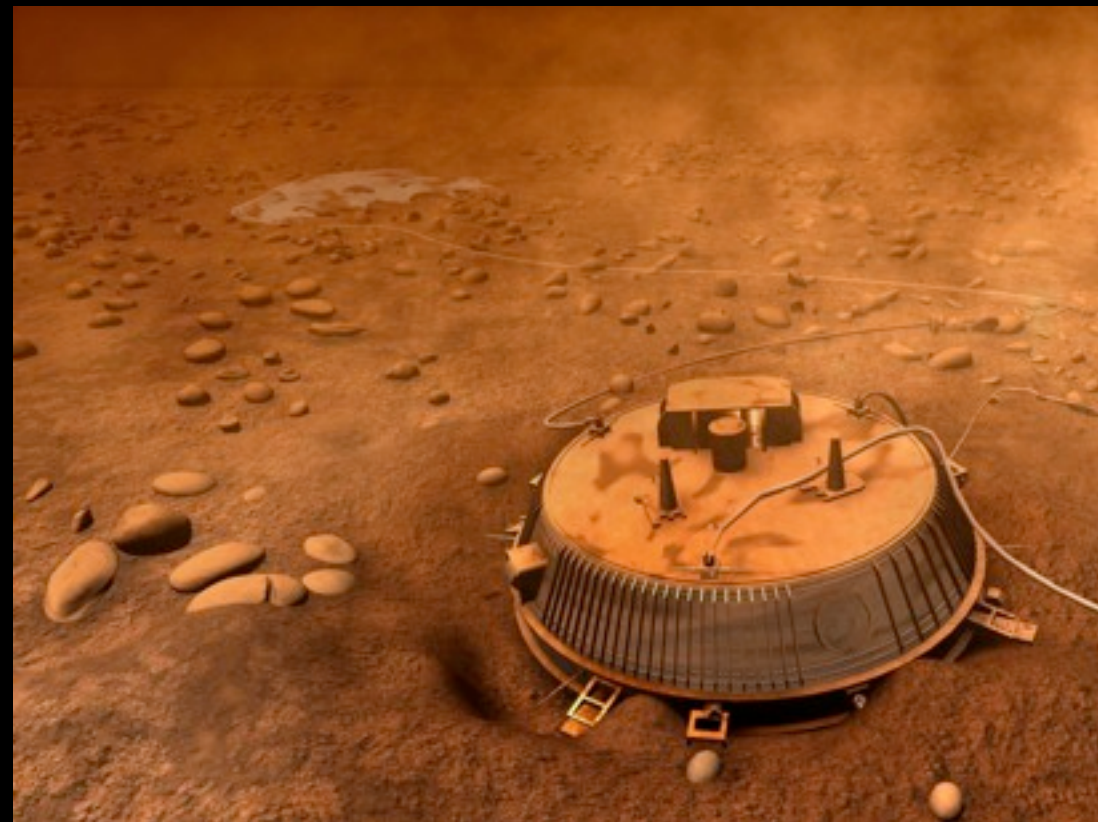
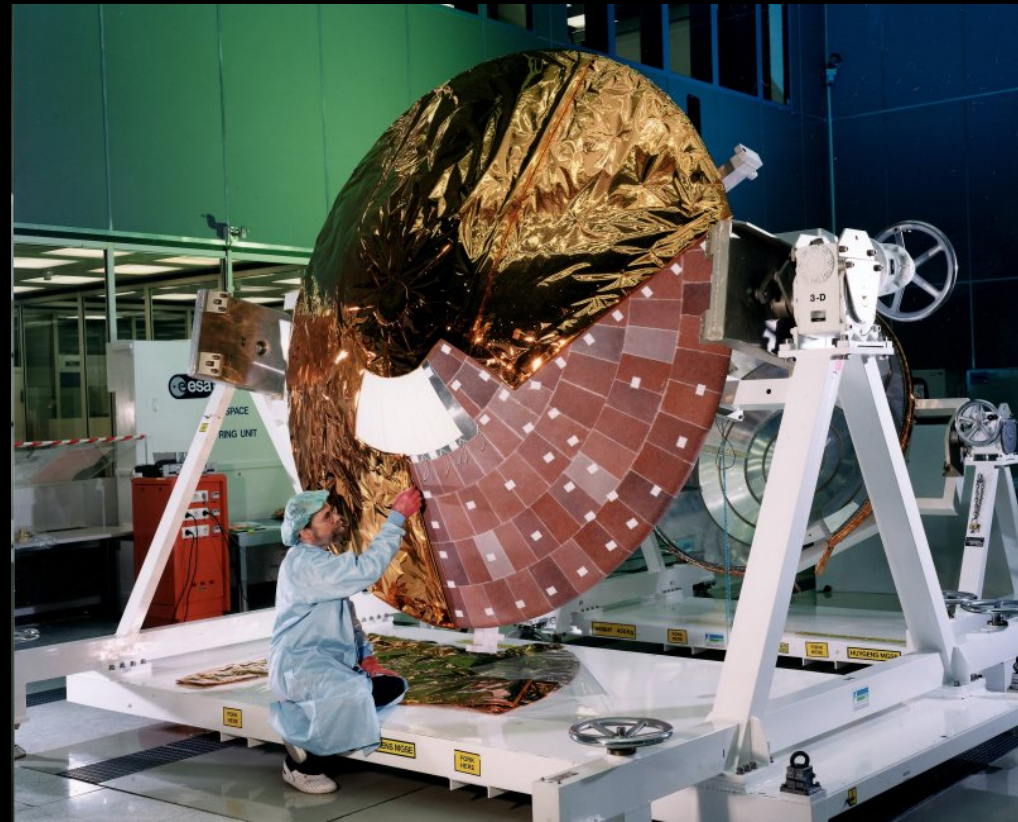


Entdecker der Saturnmonde Iapetus,  
Rhea, Tethys und Dione sowie der  
Teilung zwischen A- und B-Ring

# Cassini Orbiter (NASA)



# Huygens-Sonde (ESA)



# Der lange Weg zum Saturn

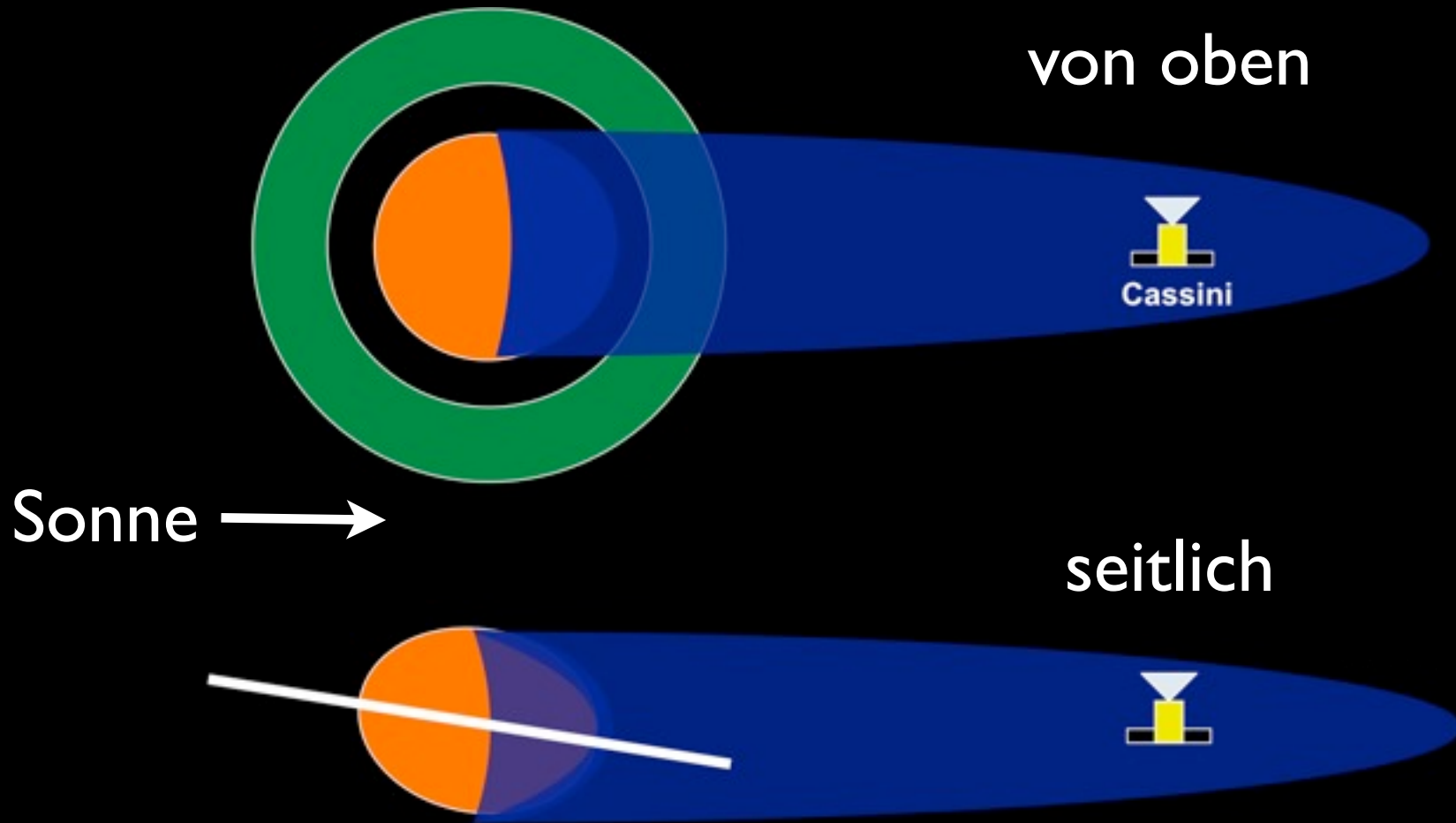


# Das Saturn-System



Aufnahme während einer Sonnenbedeckung

# Beobachtungsgeometrie

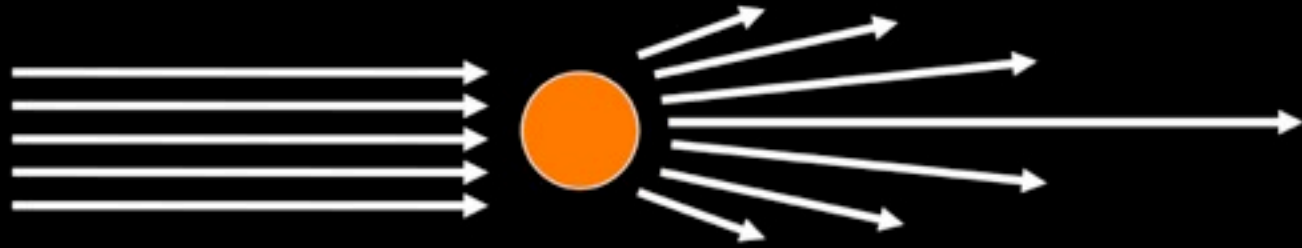


Quelle: M. Hedmann

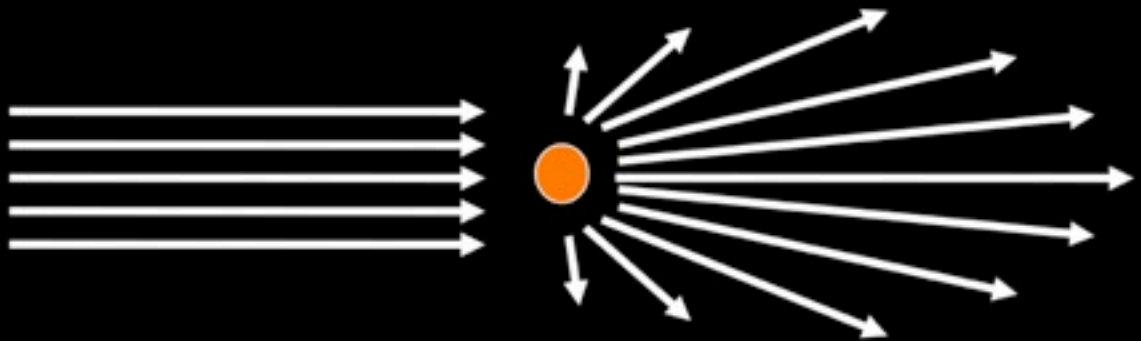
Bedeckungen sind ideal zur Beobachtung von kleinen Teilchen

# Lichtstreuung an Teilchen

Der Anteil des am Teilchen gebeugten Lichts entspricht ungefähr dem reflektierten Anteil



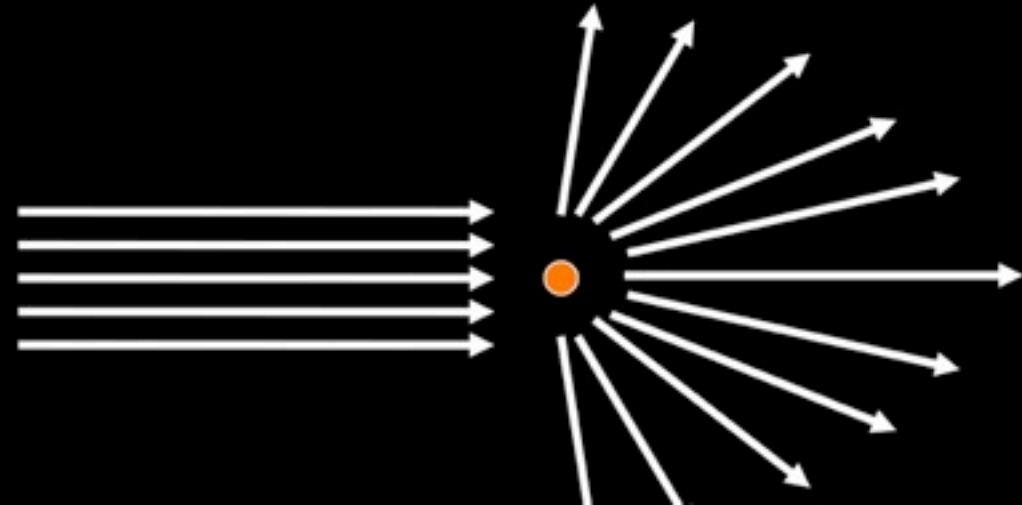
Der Öffnungswinkel des Streukonus ist jedoch  $\sim$ Wellenlänge/Größe



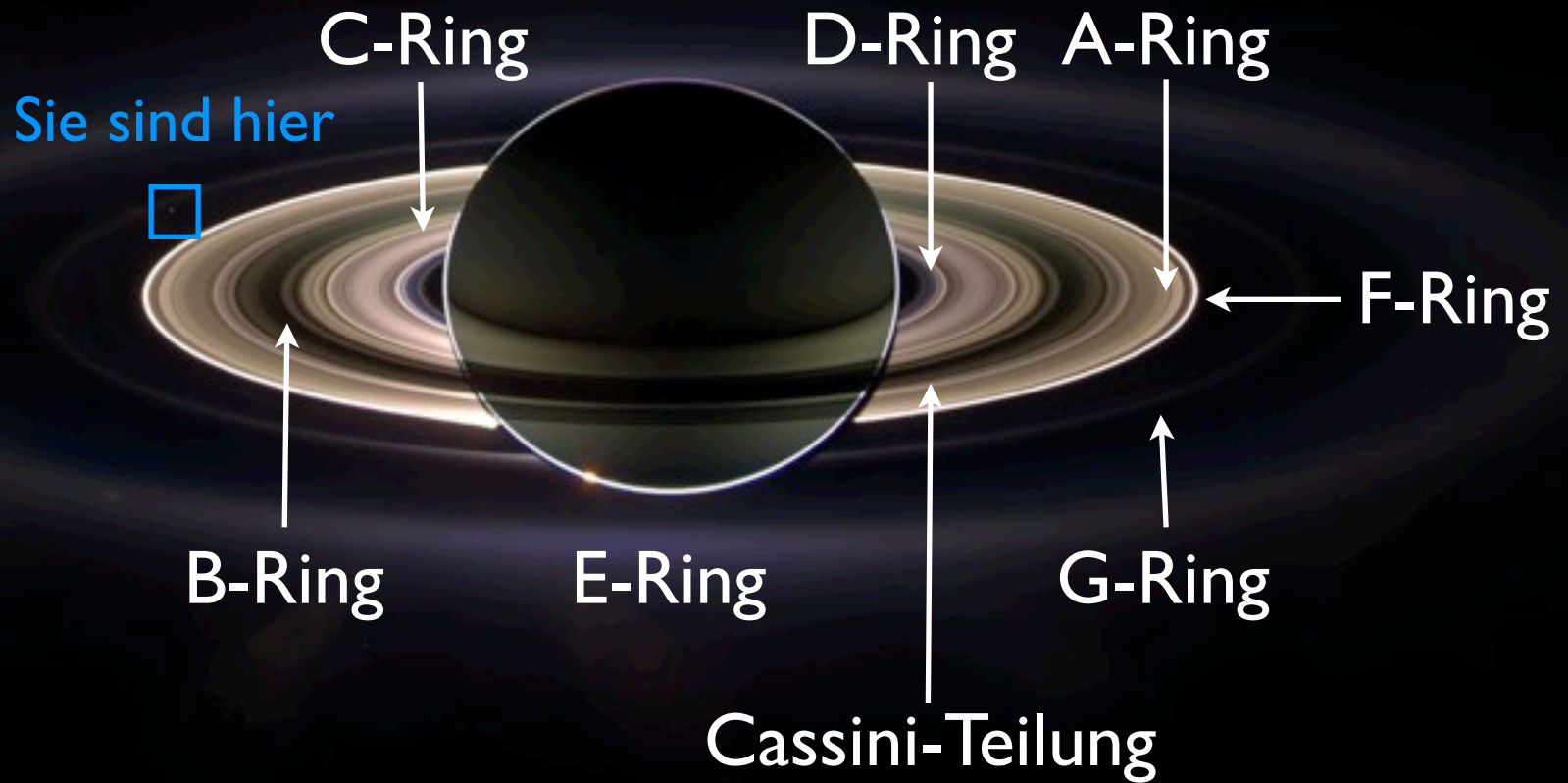
Sichtbares Licht:

1 cm Teilchen:  $<0.01^\circ$

10  $\mu\text{m}$  Teilchen:  $1^\circ$

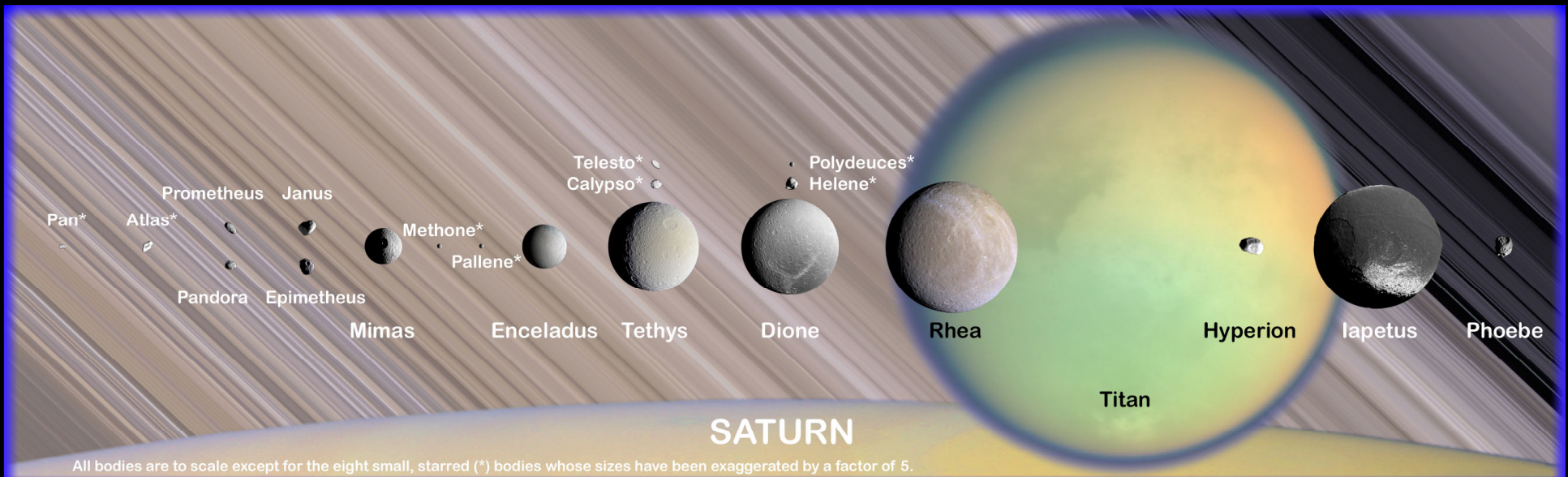


# Das Saturn-System

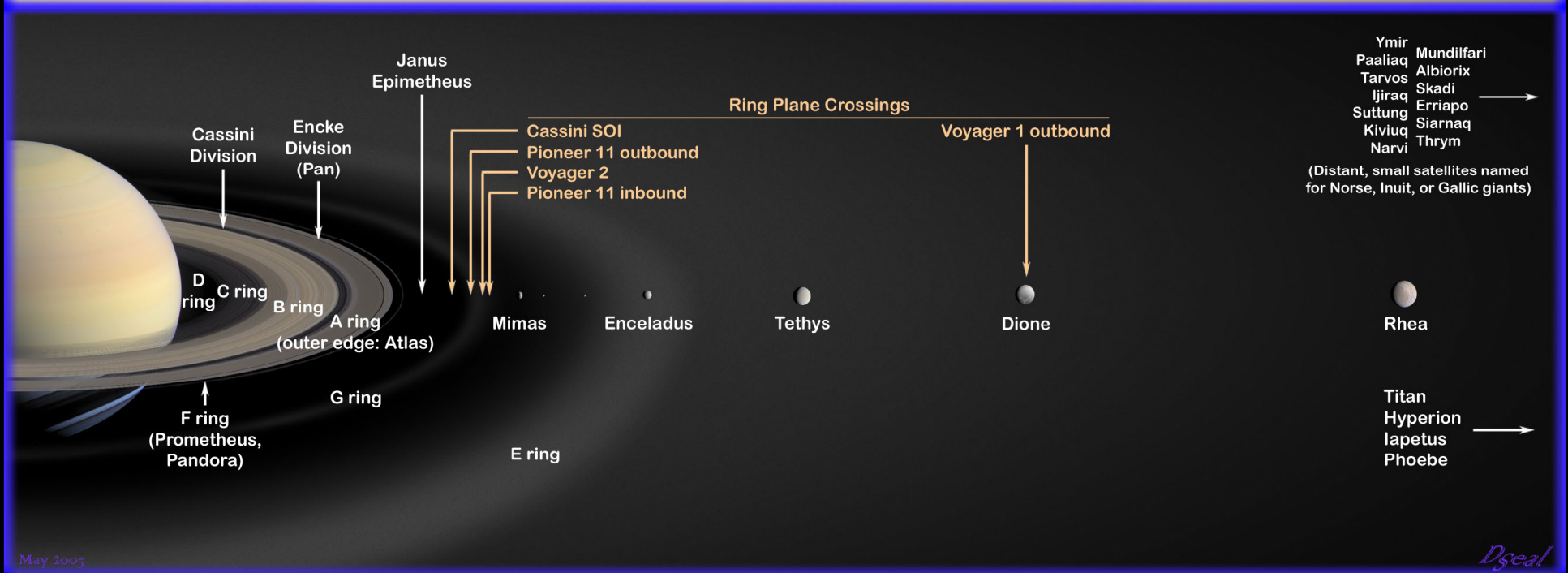




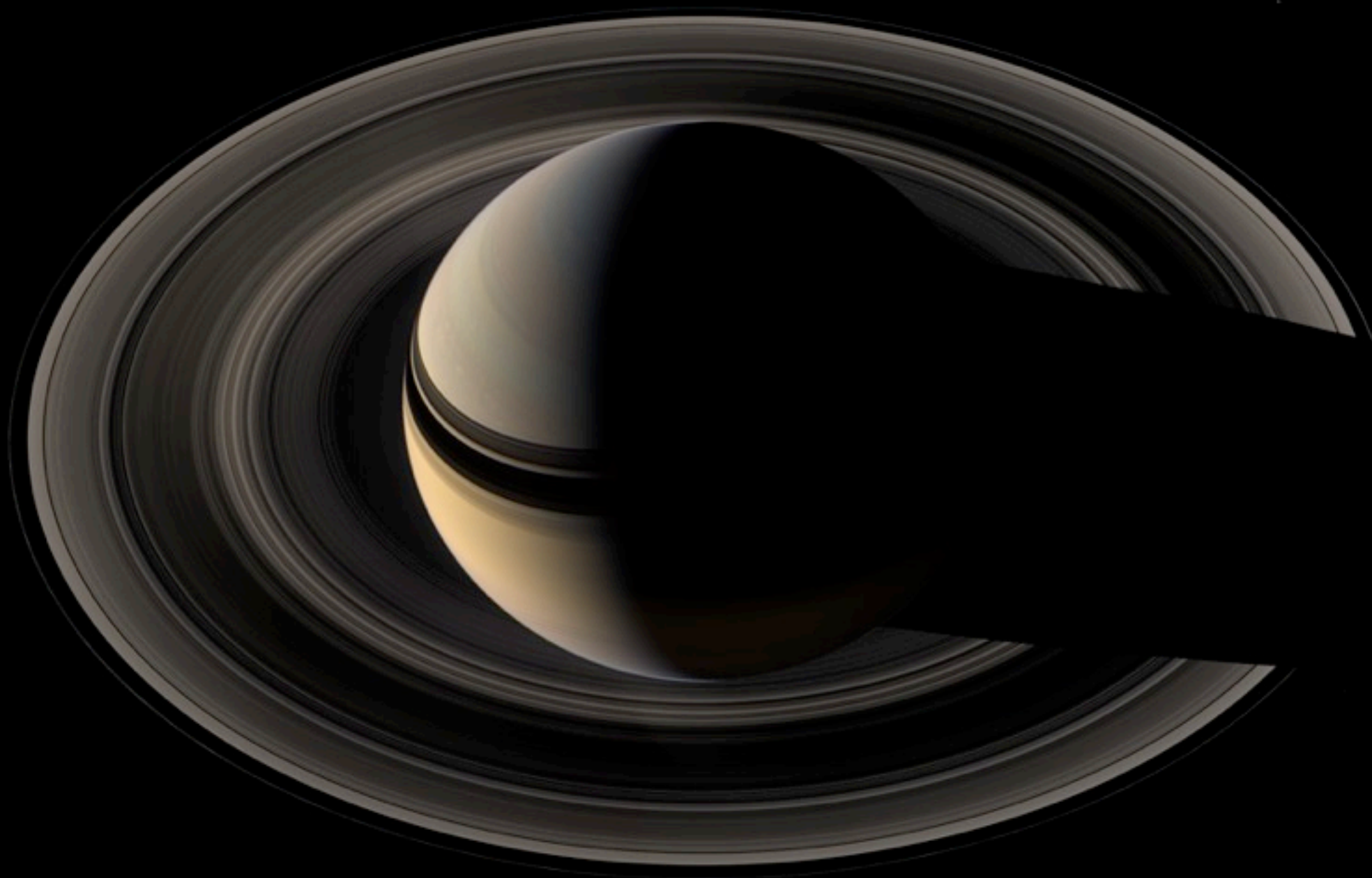
# Das Saturn-System



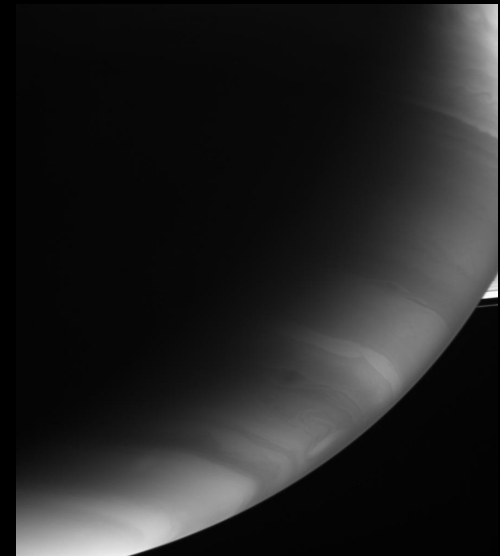
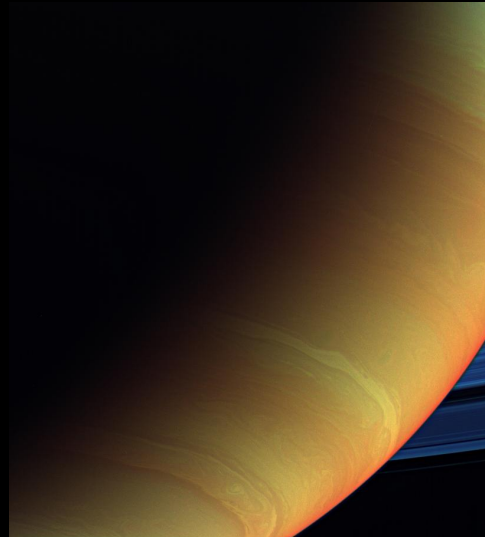
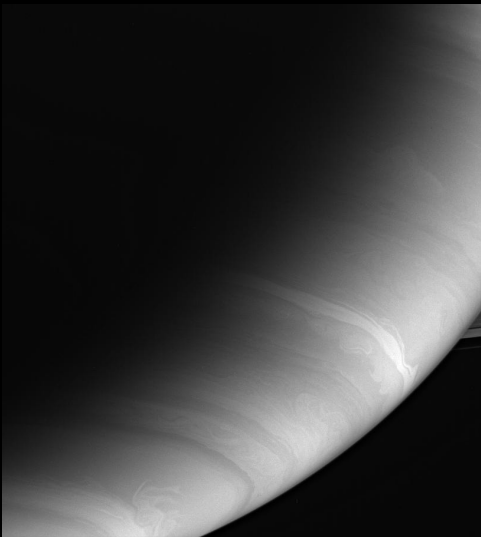
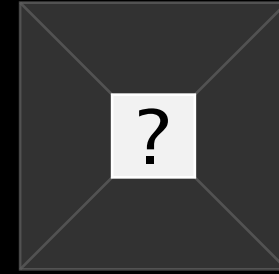
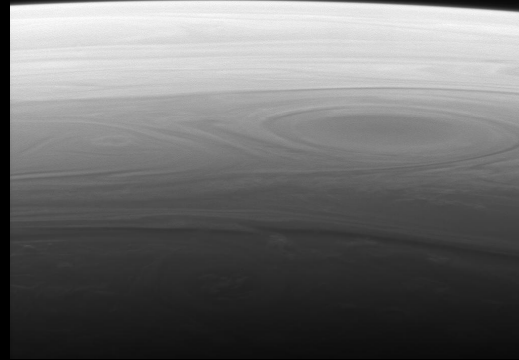
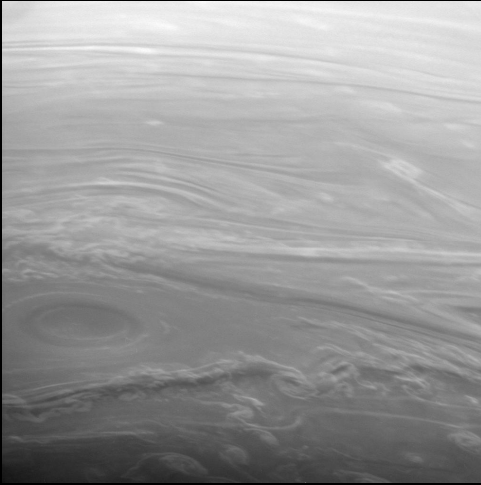
All bodies are to scale except for the eight small, starred (\*) bodies whose sizes have been exaggerated by a factor of 5.



# Saturn

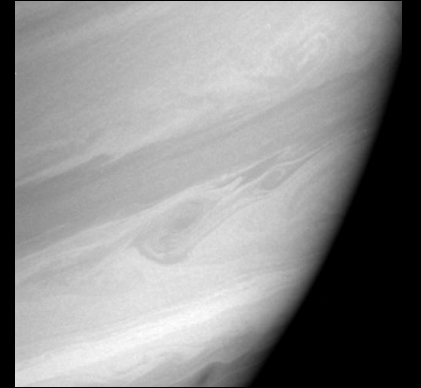
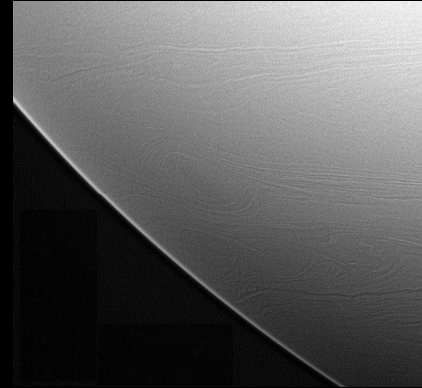
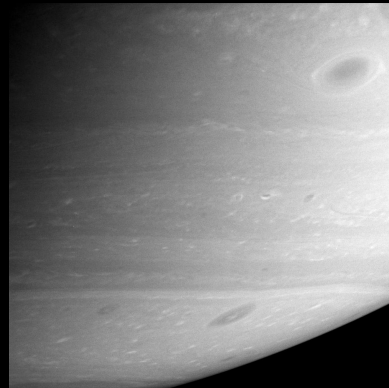
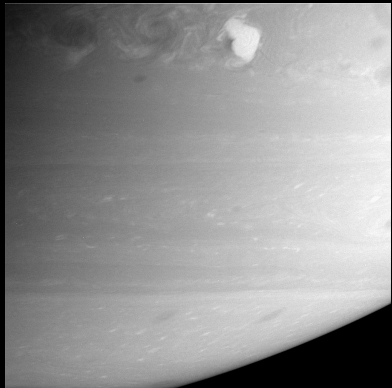
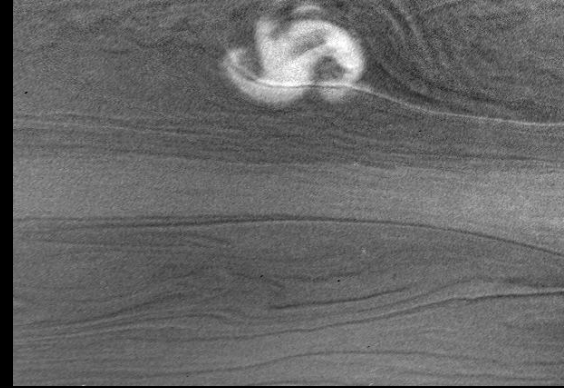
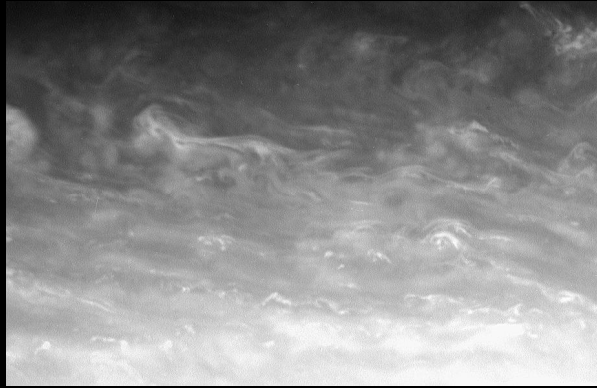
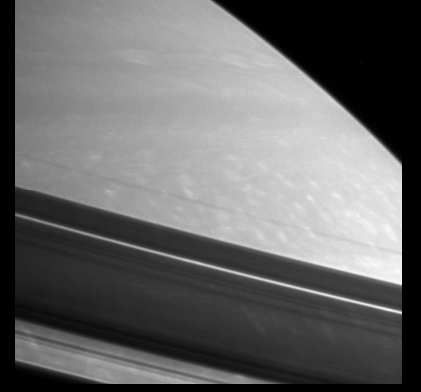
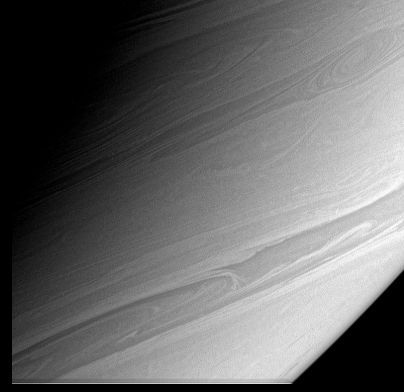
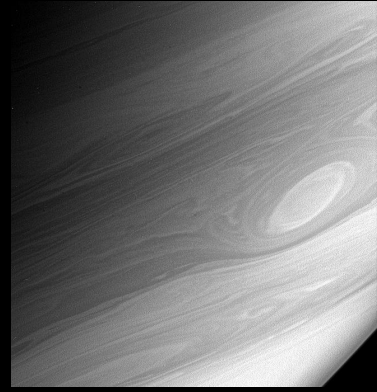
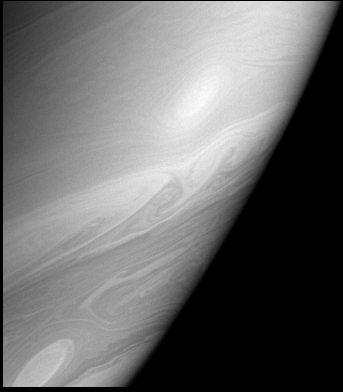


# Wolken und Stürme



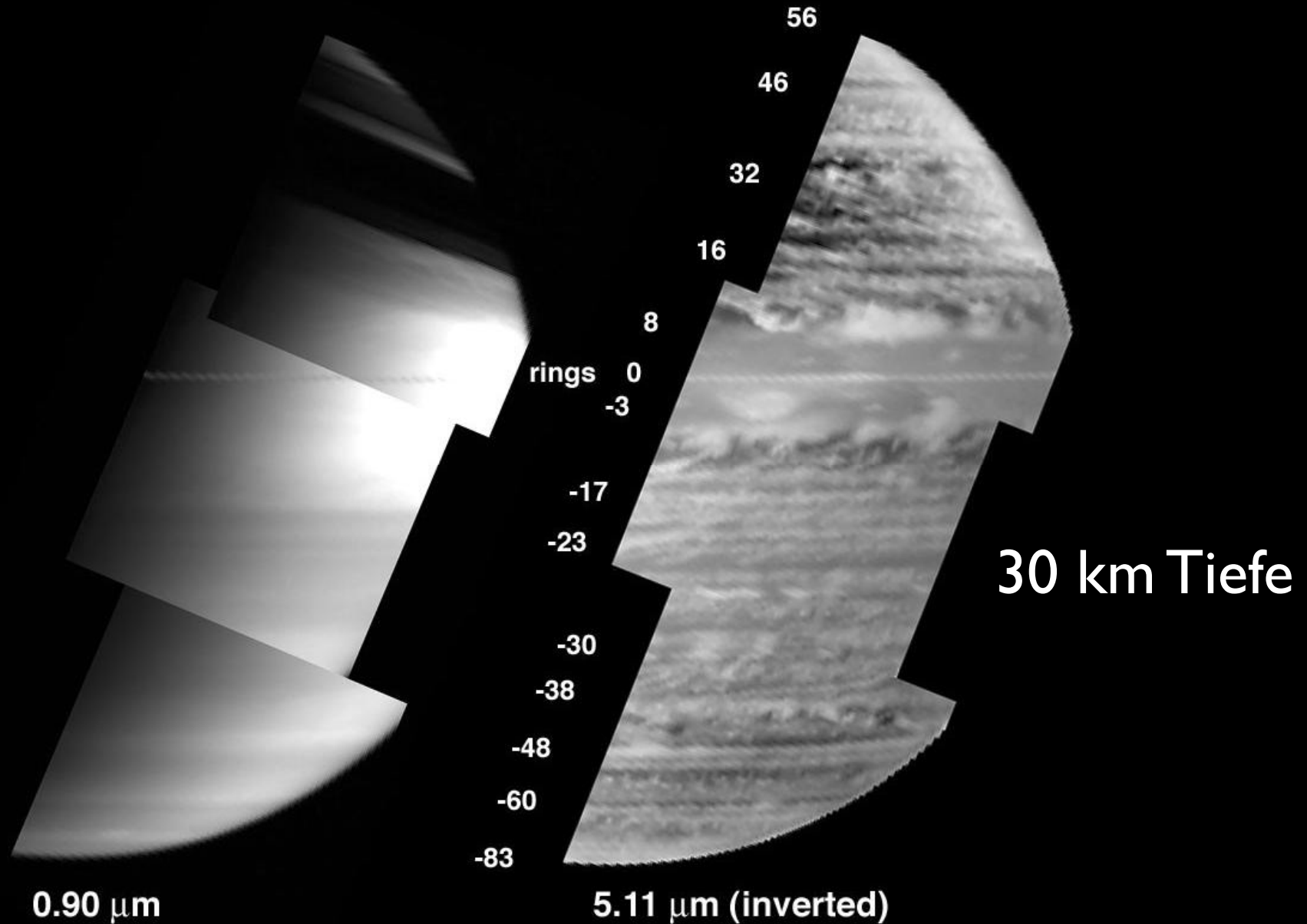


# Wolken in den oberen Schichten

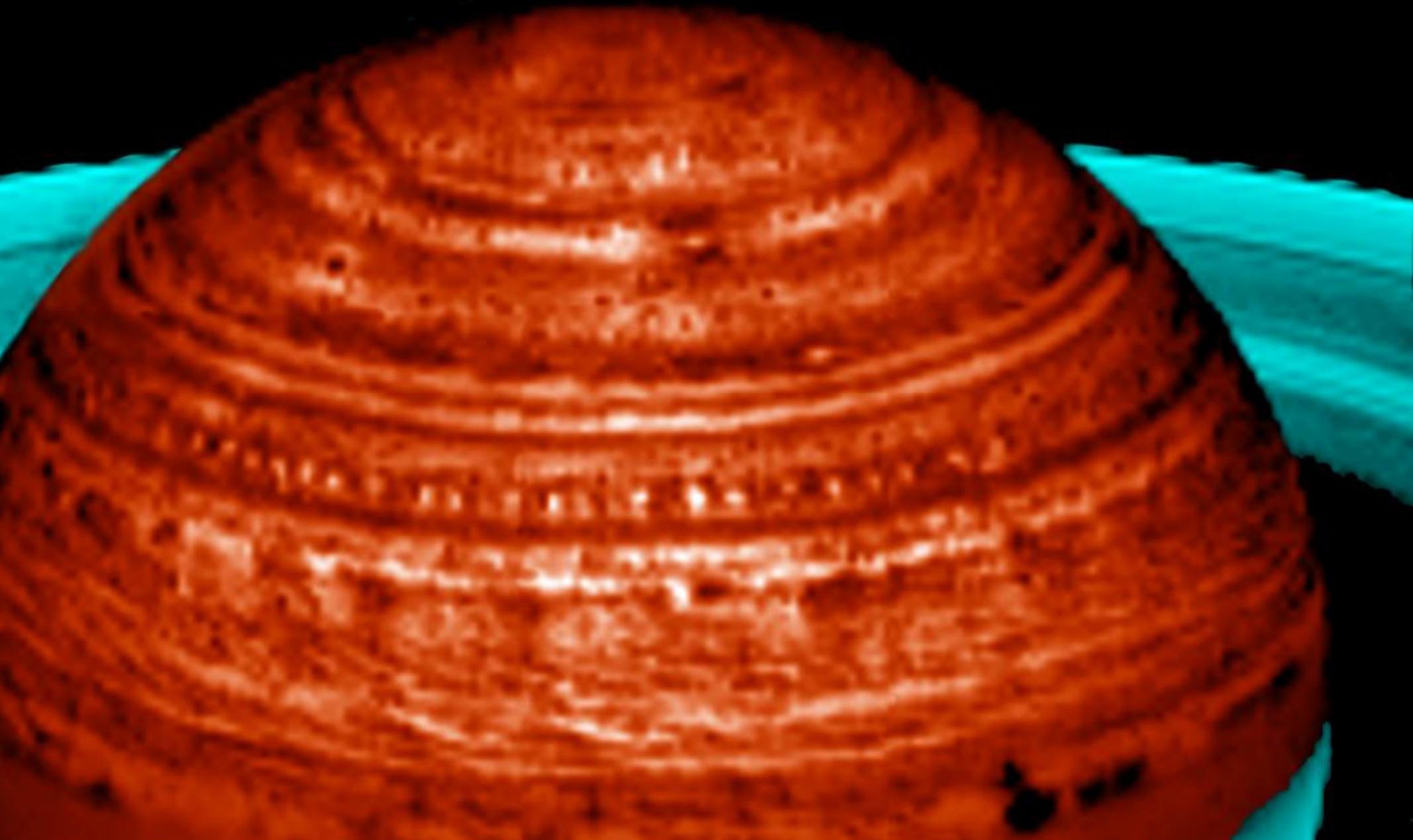




# Wolken in tiefen Schichten

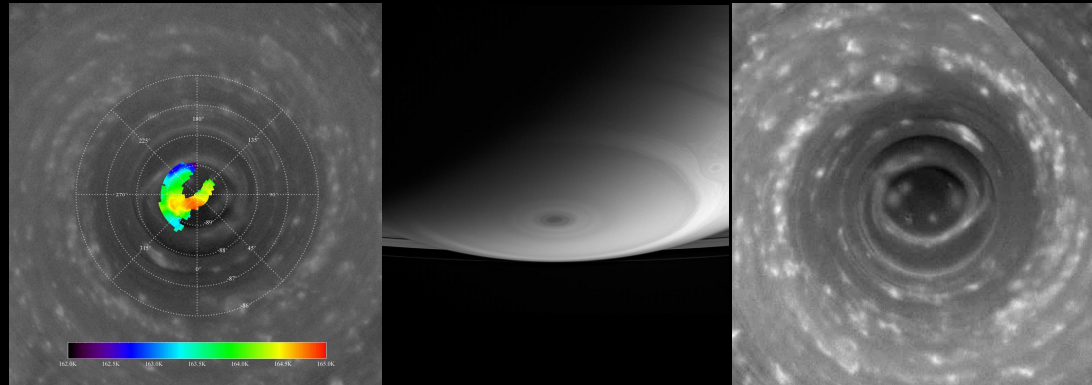


# Saturns „Perlenkette“

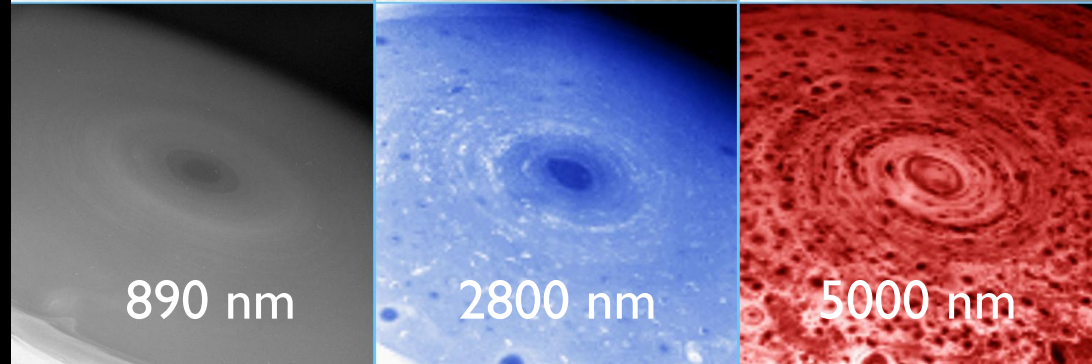
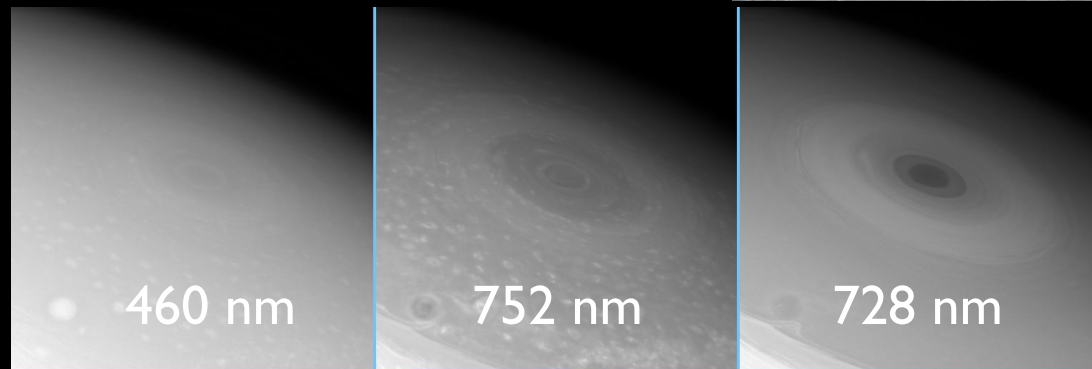


# Sturm am Südpol

Temperatur-  
verteilung

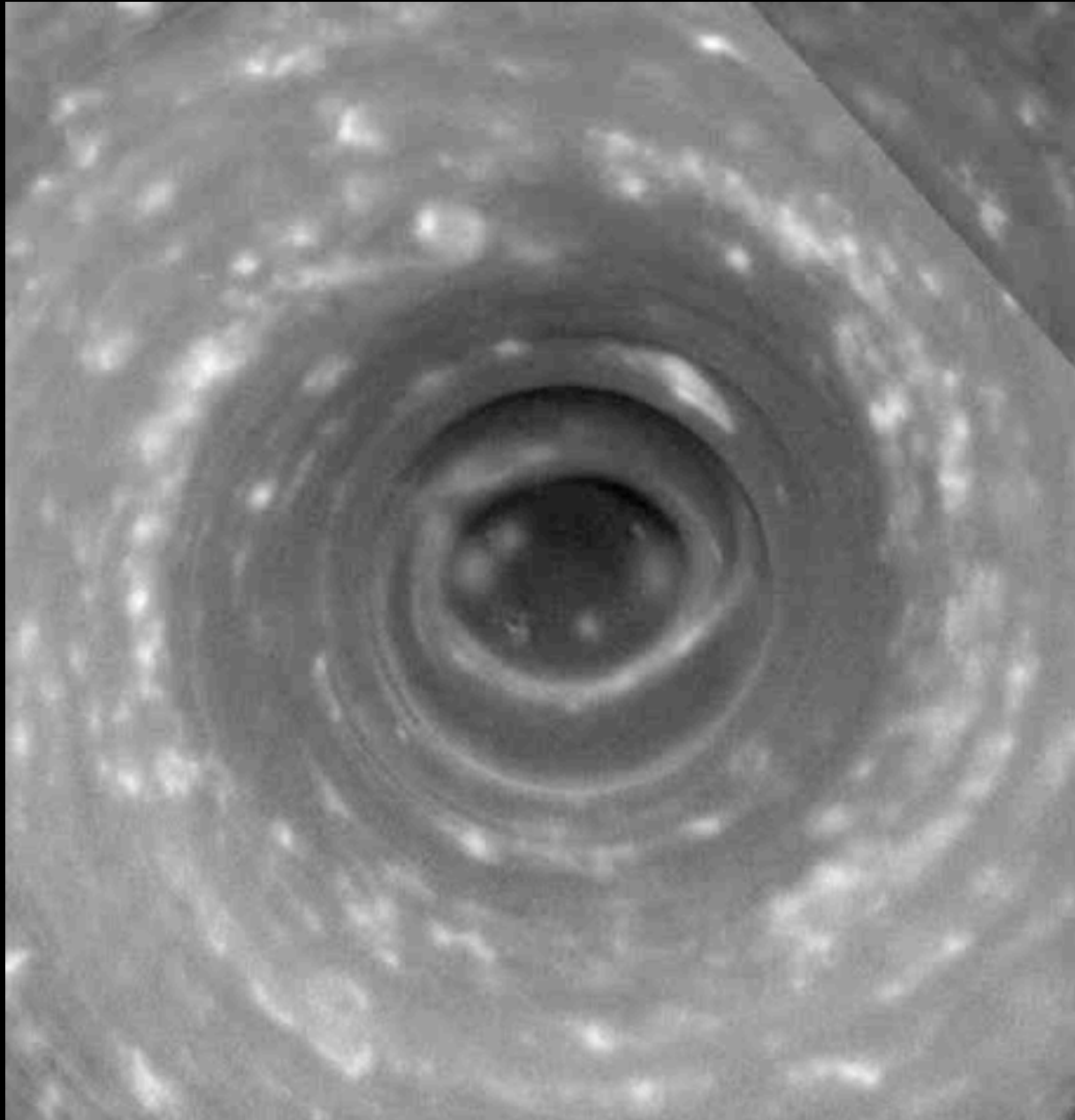


reflektiertes  
Sonnenlicht



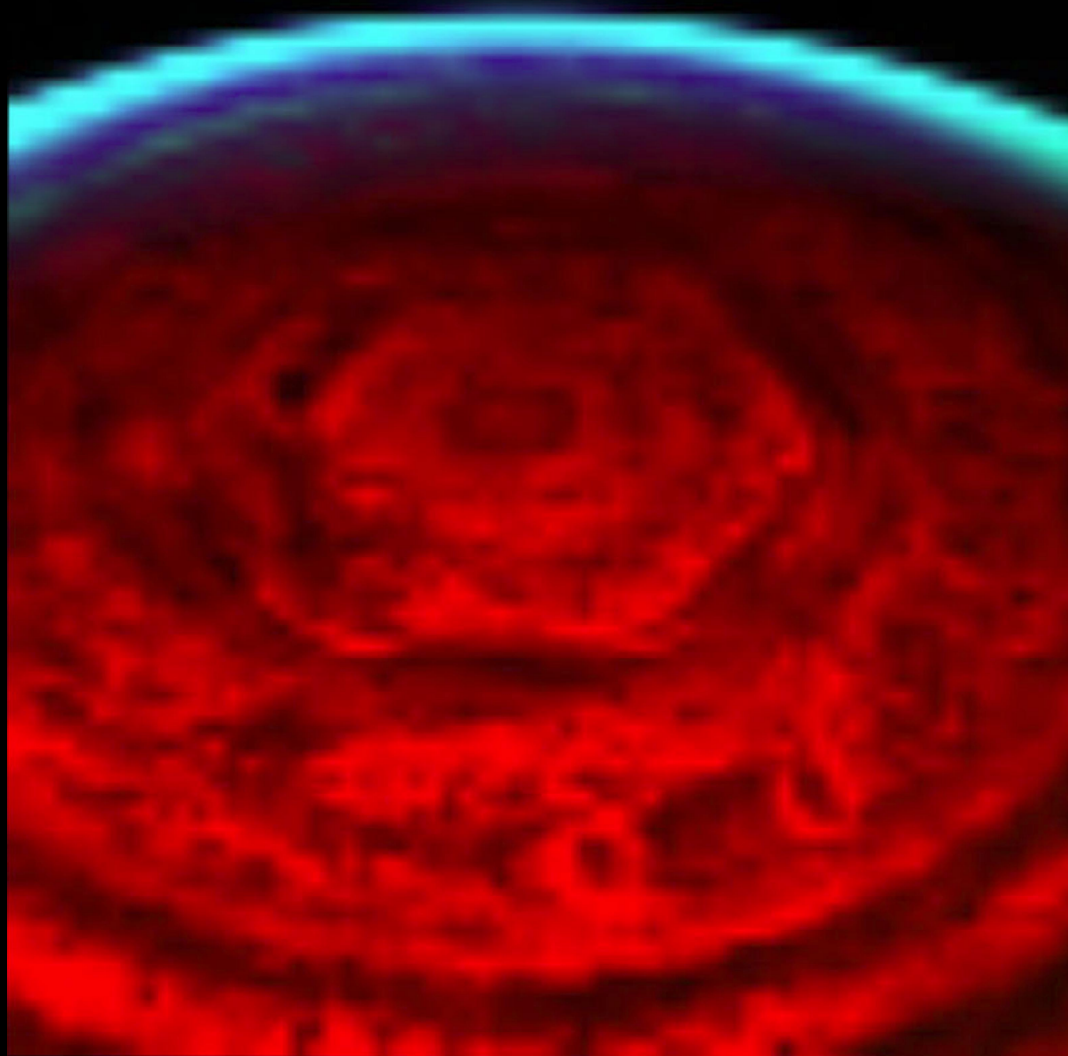
Licht aus  
dem  
Planeten-  
inneren

# Der Südpol-Wirbel

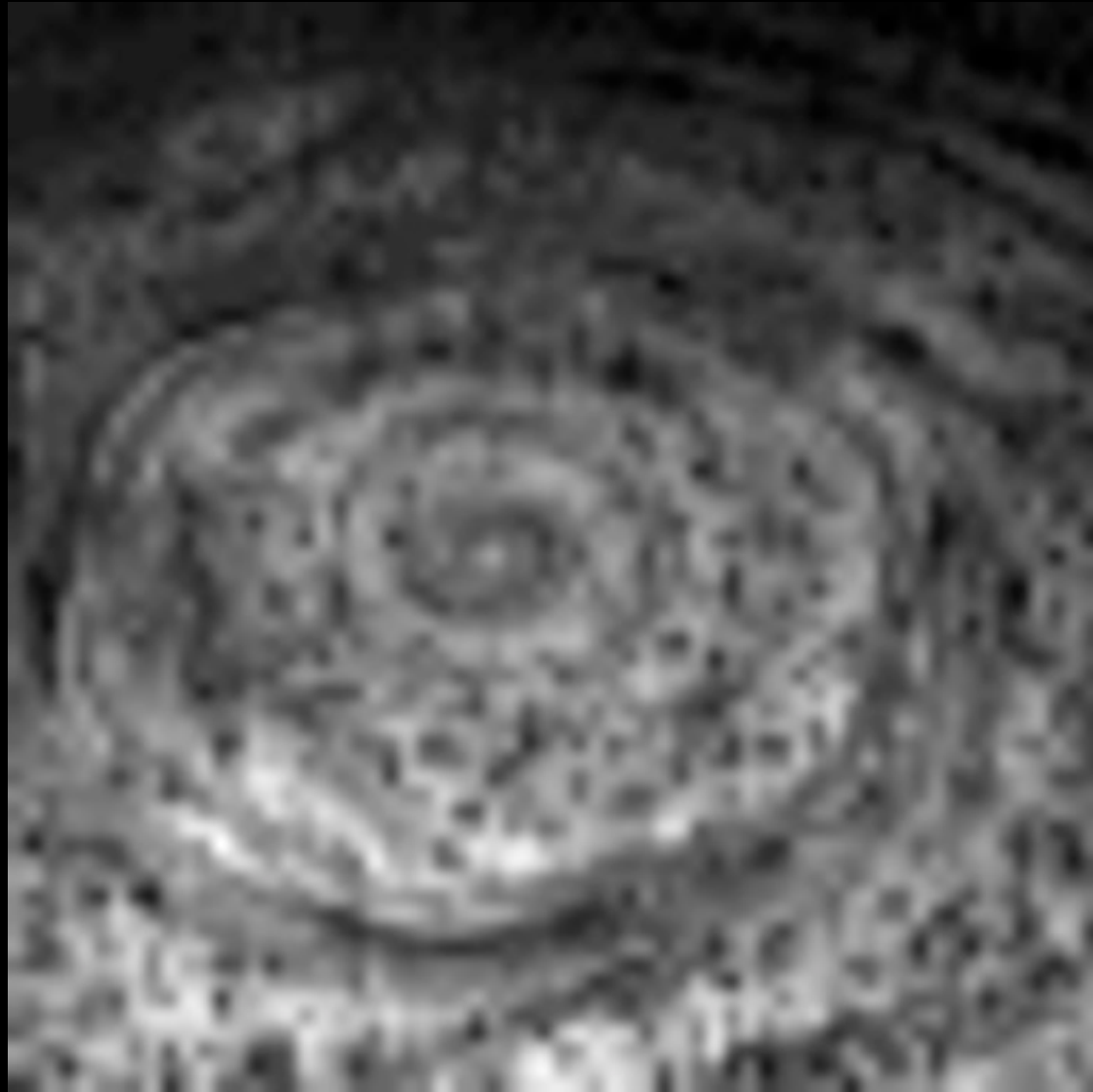




# Sturm am Nordpol



# Das „Hexagon“



# Die Ringe



# Wie groß sind die Ringteilchen?



Auflösung: 10km

violet: Teilchen  $> 5\text{cm}$

grün: Teilchen  $< 5\text{cm}$

blau: Teilchen  $< 1\text{cm}$



# Wie dick sind die Ringe?

~30 m!



Schatten der  
Cassini-Teilung

Schatten des A-Rings

Schatten des B-Rings

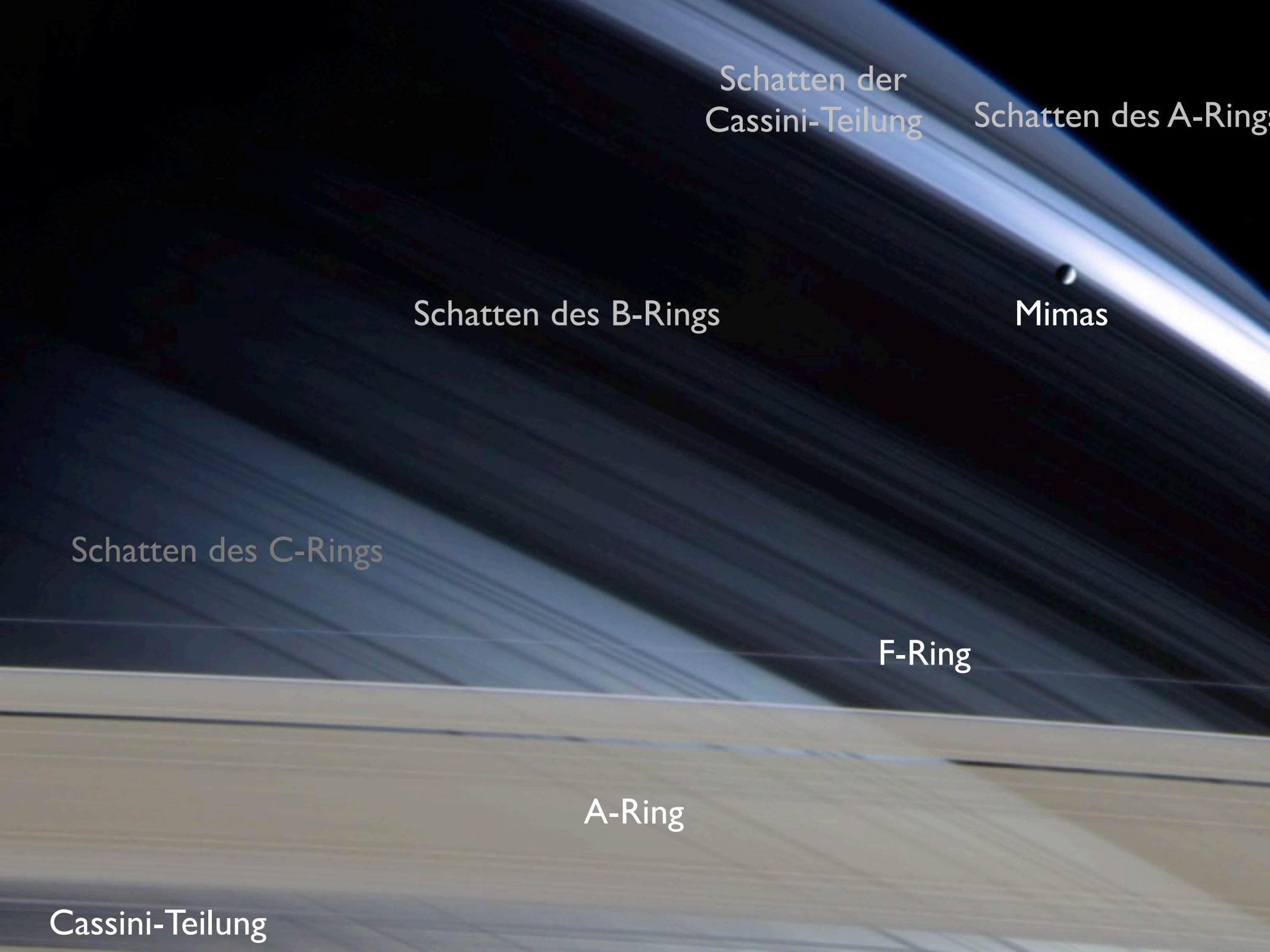
Mimas

Schatten des C-Rings

F-Ring

A-Ring

Cassini-Teilung



# Wieso sind die Ringe so dünn?

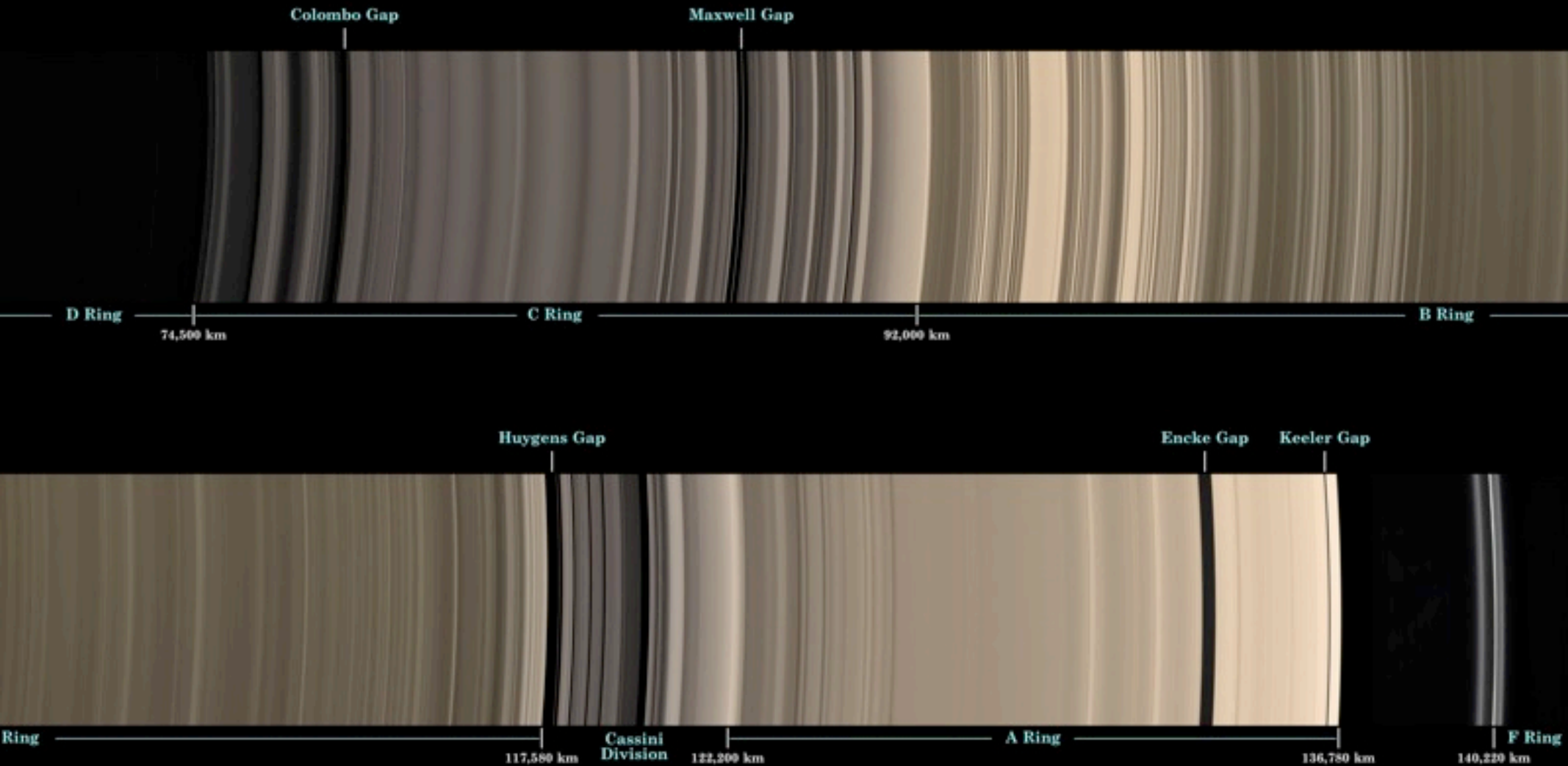
- aufgrund der großen Teilchendichte kollidiert jedes Ringteilchen ungefähr 10 mal pro Orbit
- dissipative Stöße „kühlen“ die Ringteilchen
- thermodynamisches Bild fruchtbar:



Bild: Bill Hartmann

- je „kälter“ der Ring, desto geringer dessen vertikale Dicke und desto höher die Teilchendichte in der Ringebene
- je dichter der Ring, um so größer die Stoßfrequenz der Ringteilchen und um so „wärmer“ der Ring
- Ringdicke wird durch Gleichgewicht zwischen „Kühlung“ durch dissipative Stöße und „Heizung“ durch Kepler-Scheerung eingestellt!

# Feinstruktur der Ringe

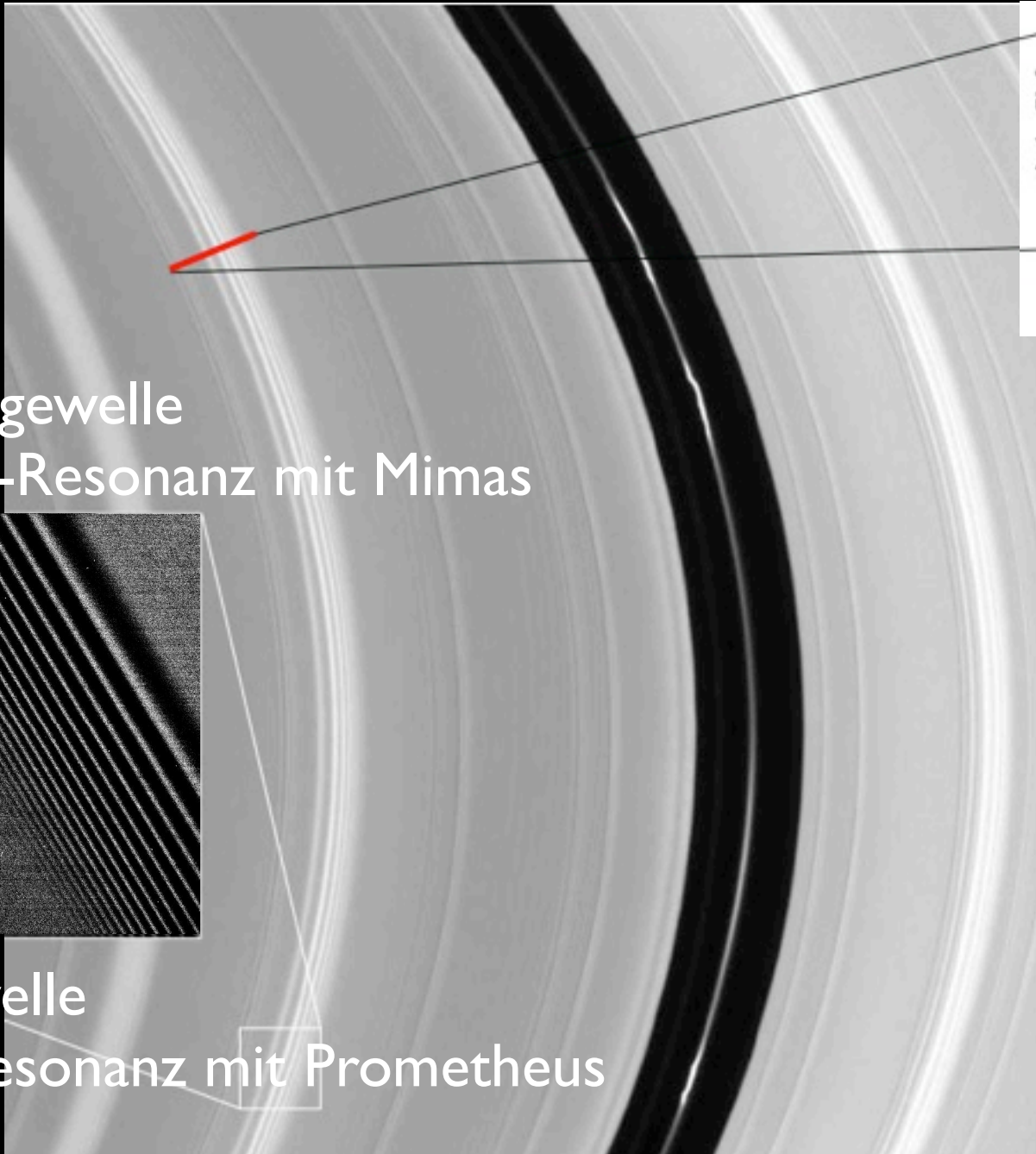




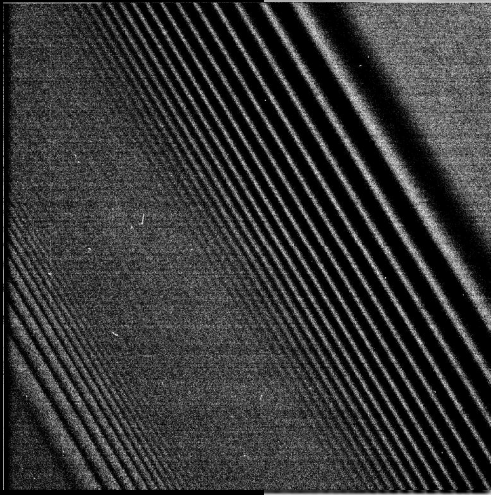
# Ursachen für die Feinstruktur

- gravitative und viskose Instabilitäten
- Wellen und Resonanzen
- Lücken, Bugwellen und „Propeller“ erzeugt durch kleine Monde

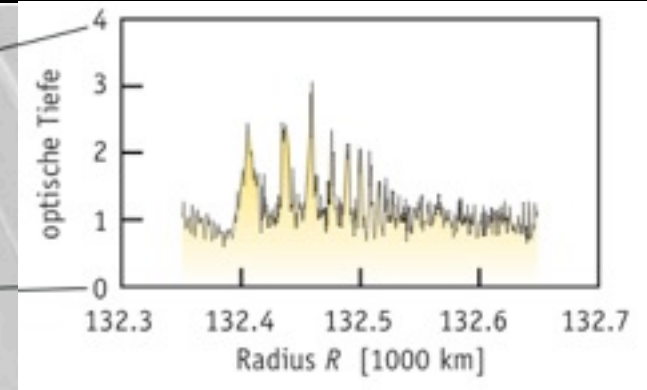
# Resonanzen



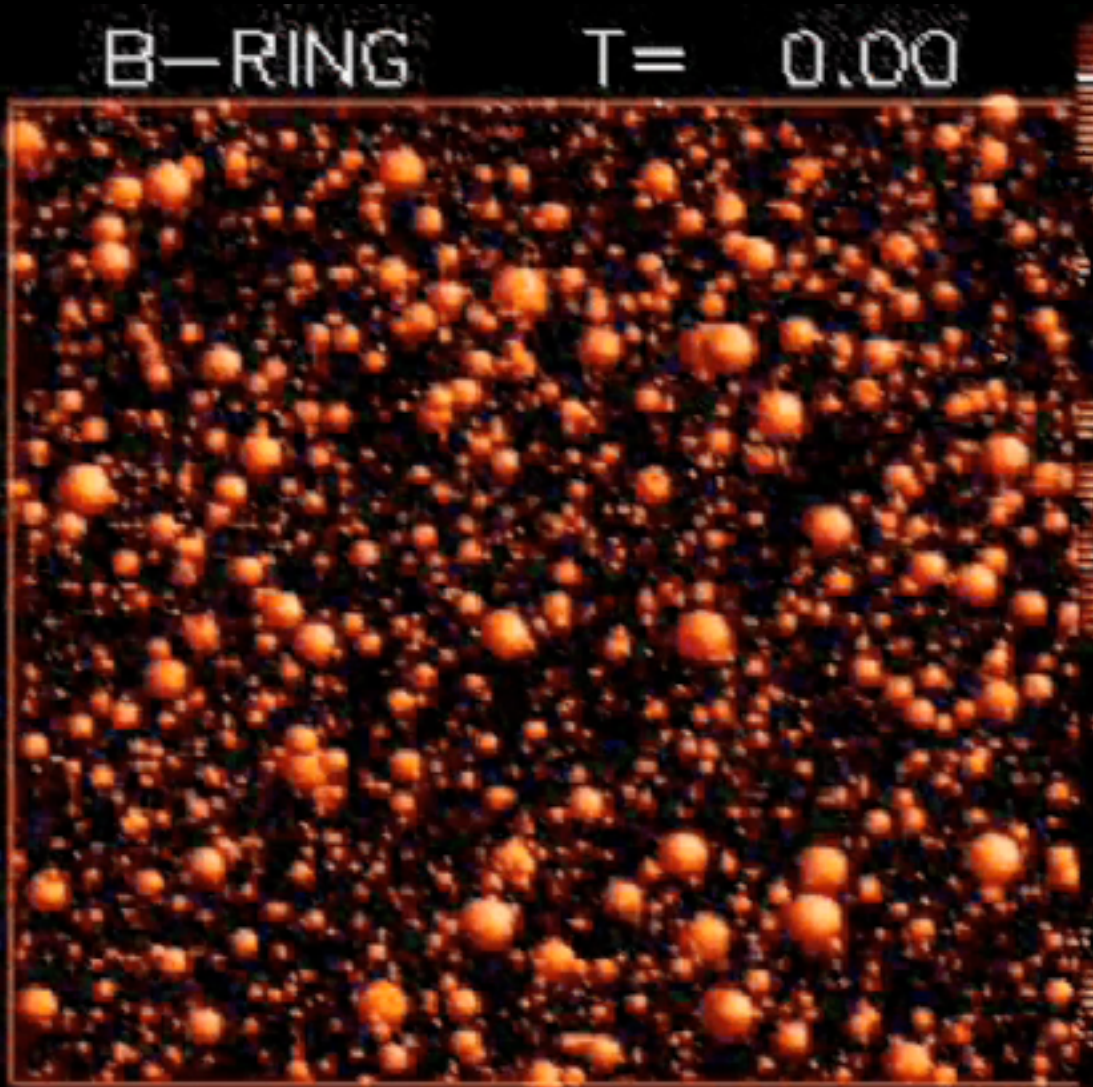
Biegewelle  
5:3-Resonanz mit Mimas



Dichtewelle  
12:11-Resonanz mit Prometheus



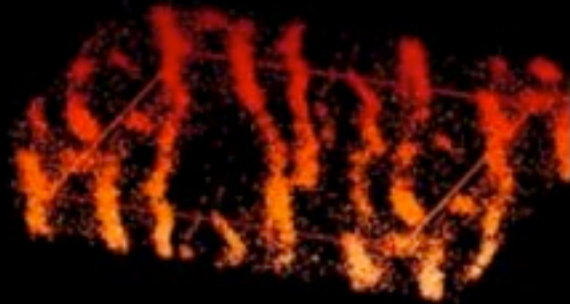
# Selbstgravitationsbugwellen im A- und B-Ring



- Selbstgravitation bildet temporäre  $\sim 100\text{m}$  lange und  $\sim 10\text{m}$  breite Filamente
- Abstand: Toomre-Wellenlänge  $\sim 50\text{m}$
- $20..25^\circ$  zur mittleren Bewegungsrichtung geneigt

# SG-Bugwellen beobachtbar

$\theta = 249^\circ, B = 24^\circ$



$\theta = 339^\circ, B = 24^\circ$



$\theta = 249^\circ, B = 12^\circ$



$\theta = 339^\circ, B = 12^\circ$



$\theta = 249^\circ, B = 4^\circ$



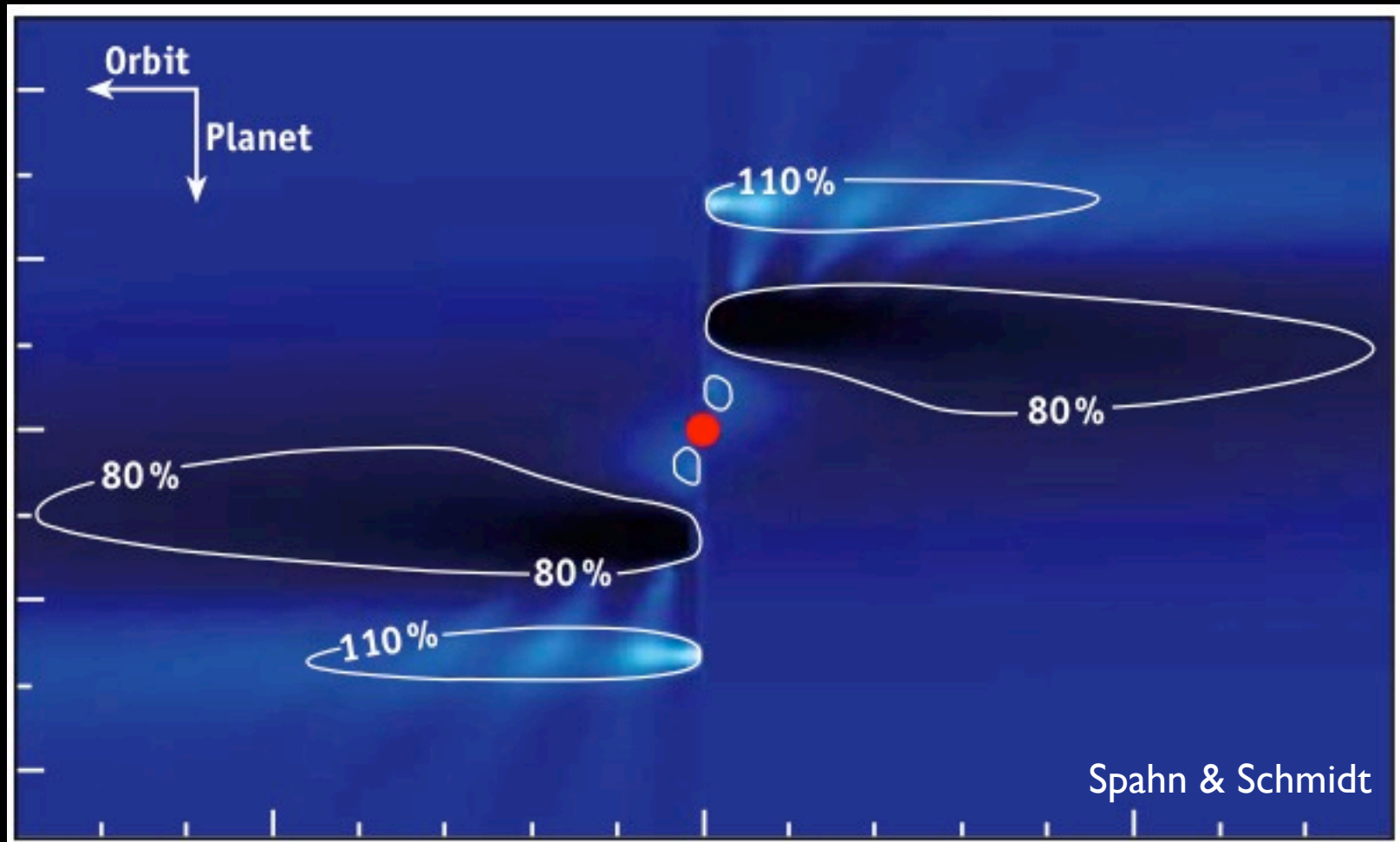
$\theta = 339^\circ, B = 4^\circ$



Ringhelligkeit hängt von der Beobachterposition ab!



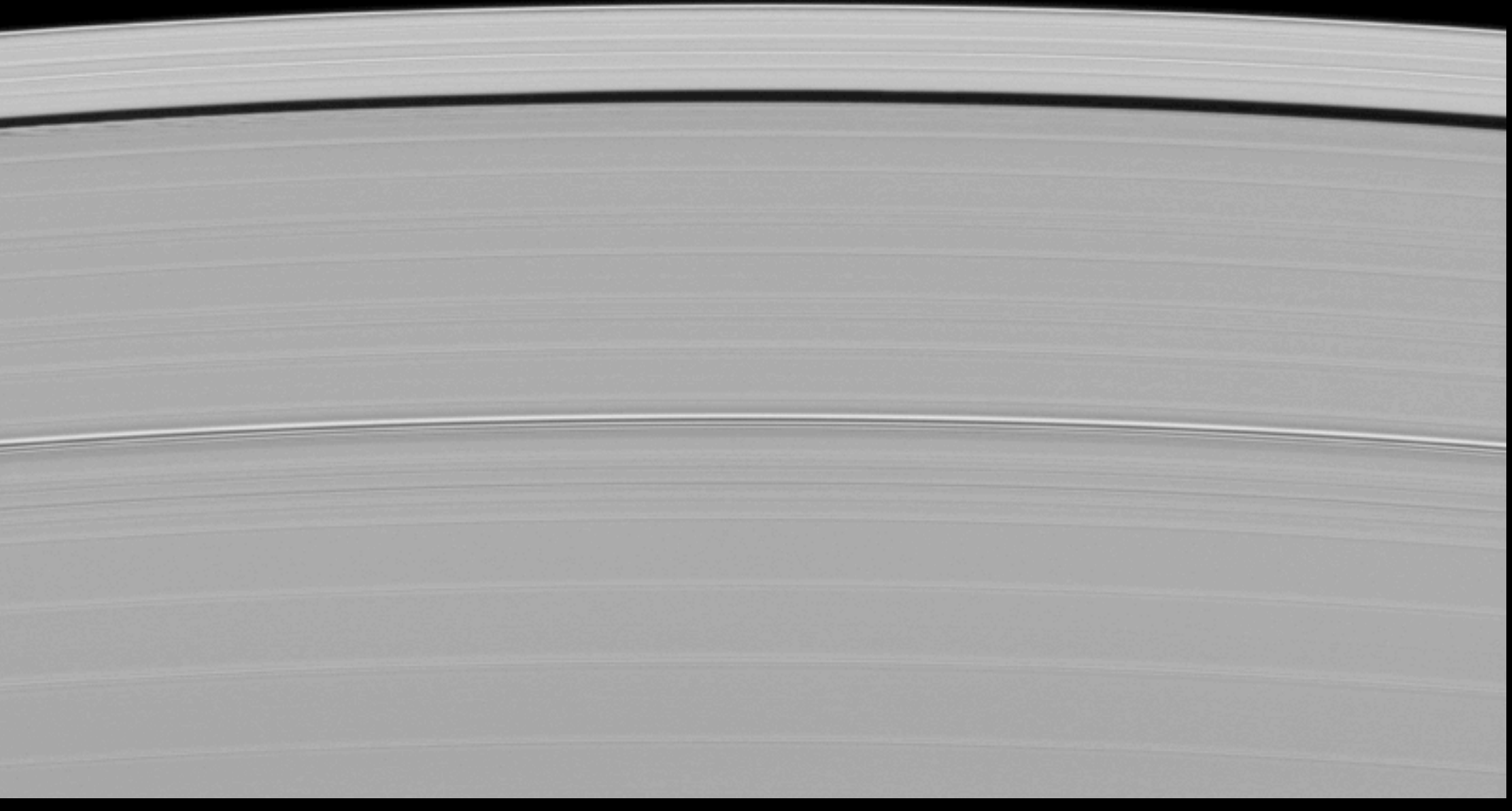
# Propeller, Lücken und Monde



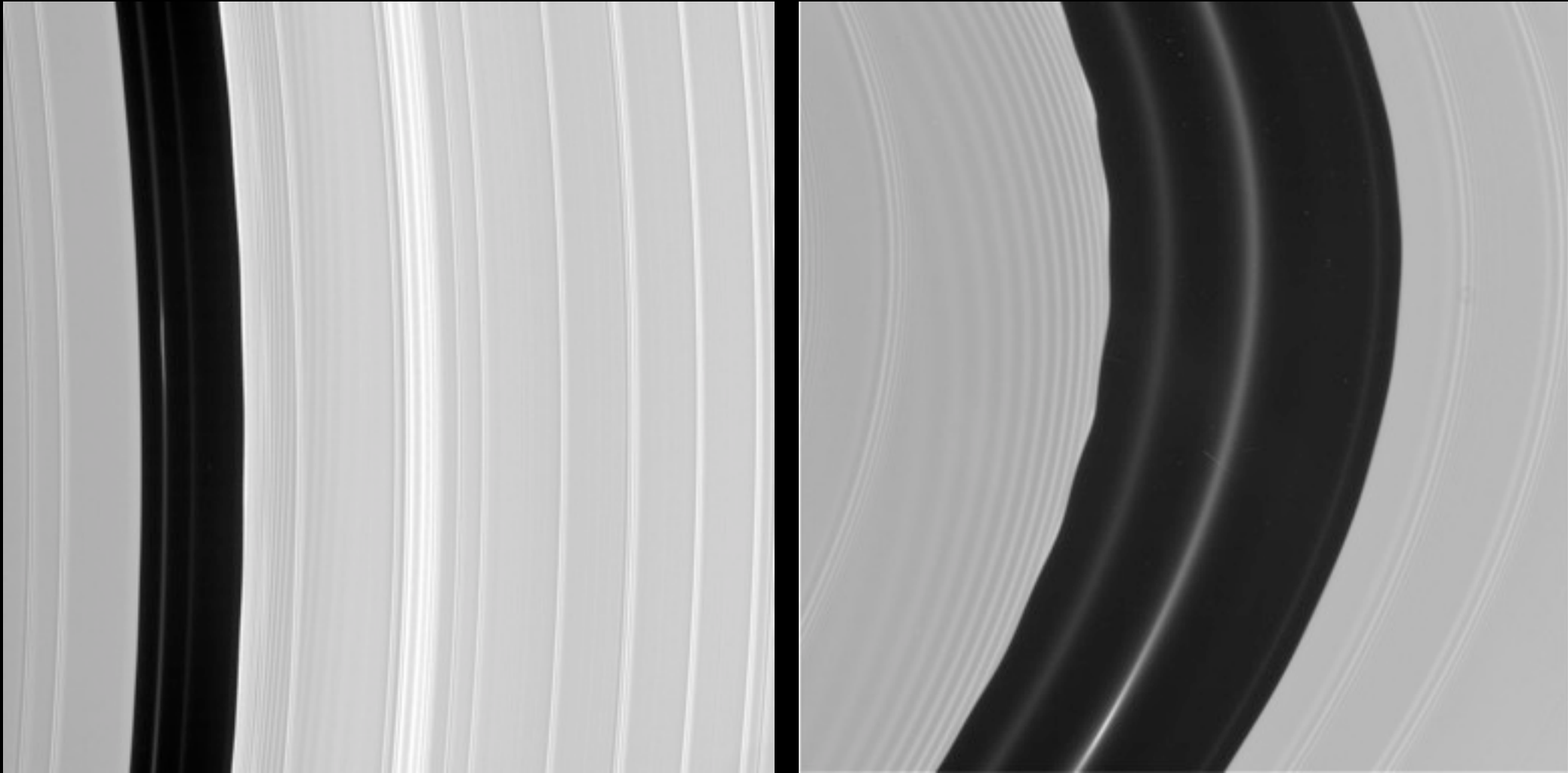
Gravitationswirkung kleiner Ringmonde kann (mehr oder weniger geschlossene) Lücken im Ring öffnen

# Keeler-Lücke

Cassini entarnte 7km große Daphnis als Wellenmacher

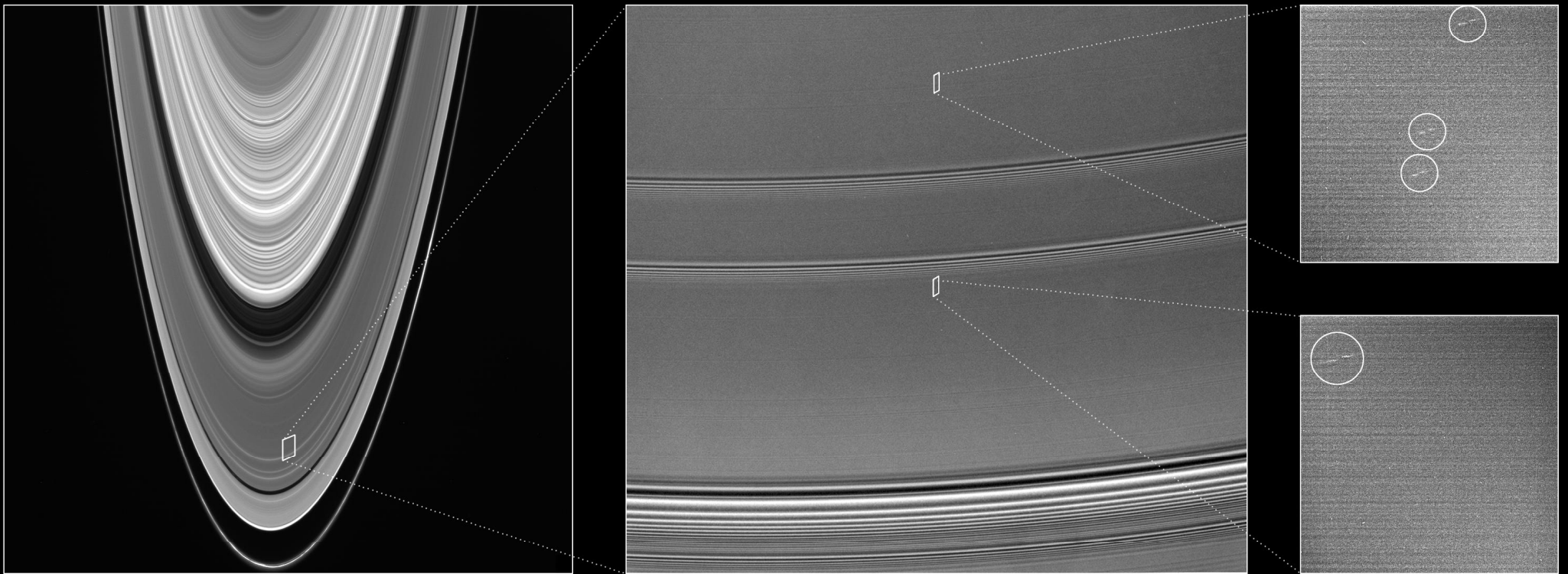


# Pan „öffnet“ die Encke-Lücke



aus Wellenlänge und Amplitude der Kantenwelle kann die Bahn und die Masse des Ringmonds bestimmt werden!

# noch kleinere Monde erzeugen „Propeller“



typische Größen von 60 bis 100m

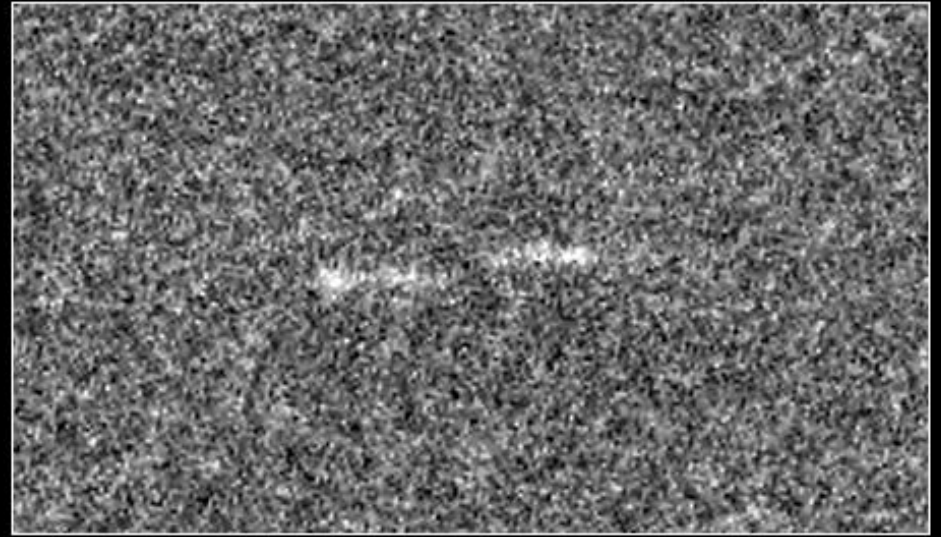
Sremcevic et al., Nature, 2007



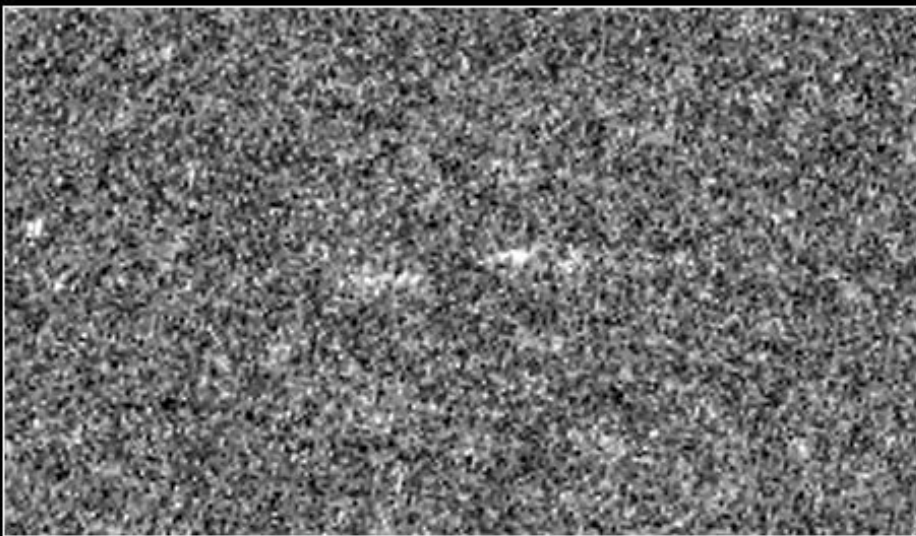
# Propeller im A-Ring



Feature 1



Feature 2



Feature 3

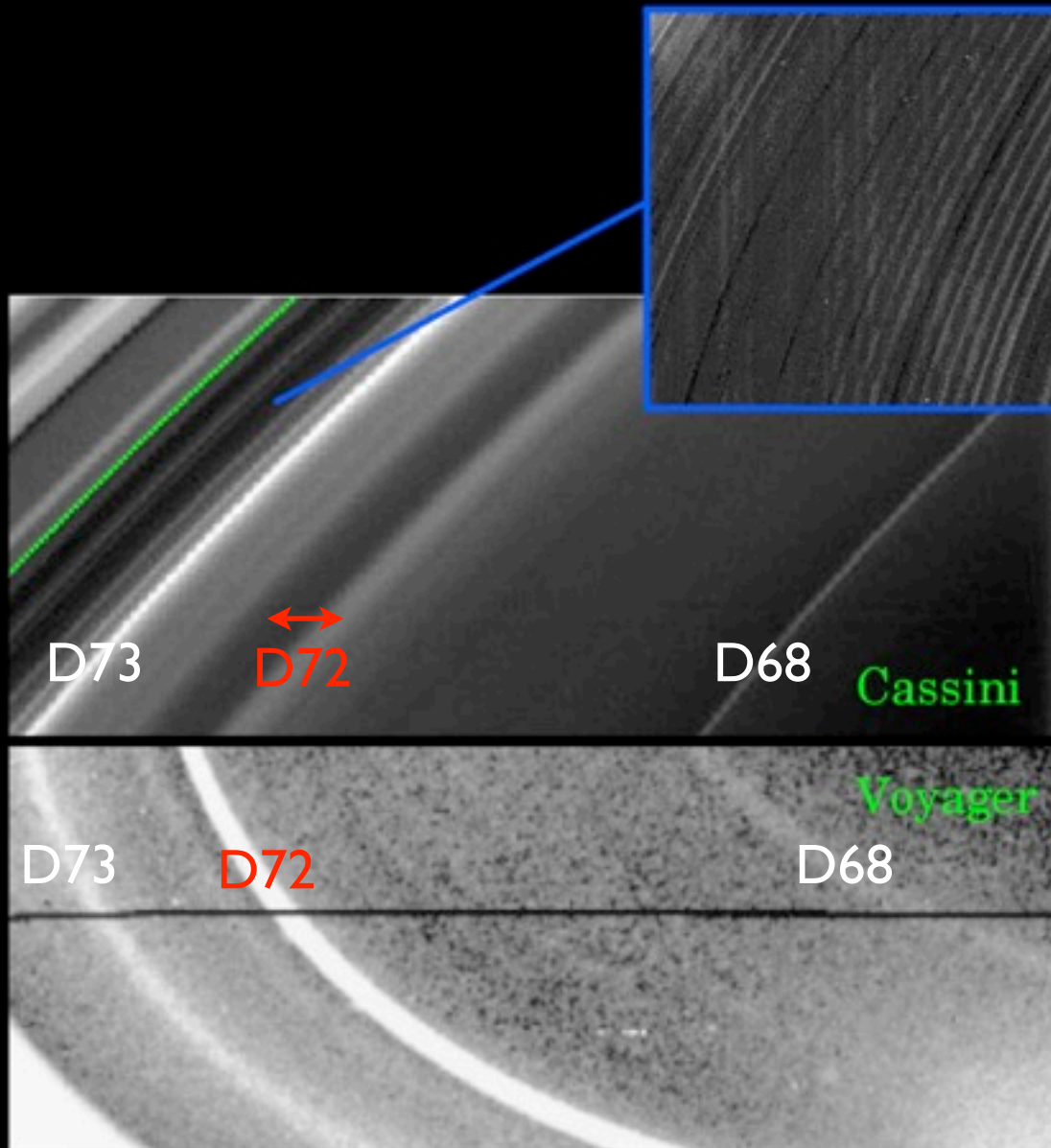


Feature 4

# Der D-Ring

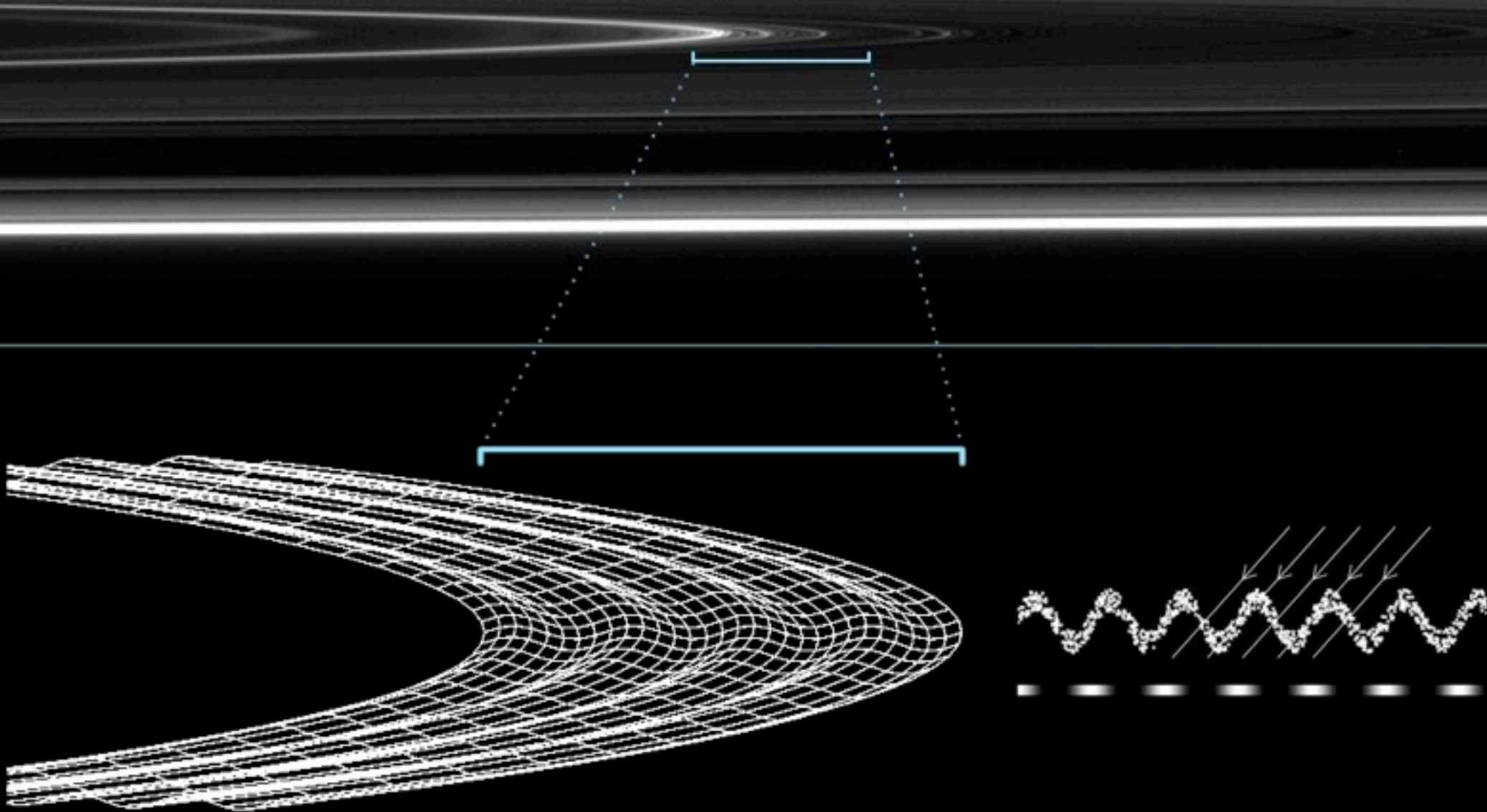
The background of the slide is abstract, featuring a dark, almost black left half and a light, almost white right half, separated by a smooth, curved boundary that resembles a lens or a ring. The overall effect is minimalist and modern.

# Stark veränderte D-Ring- Struktur seit Voyager I



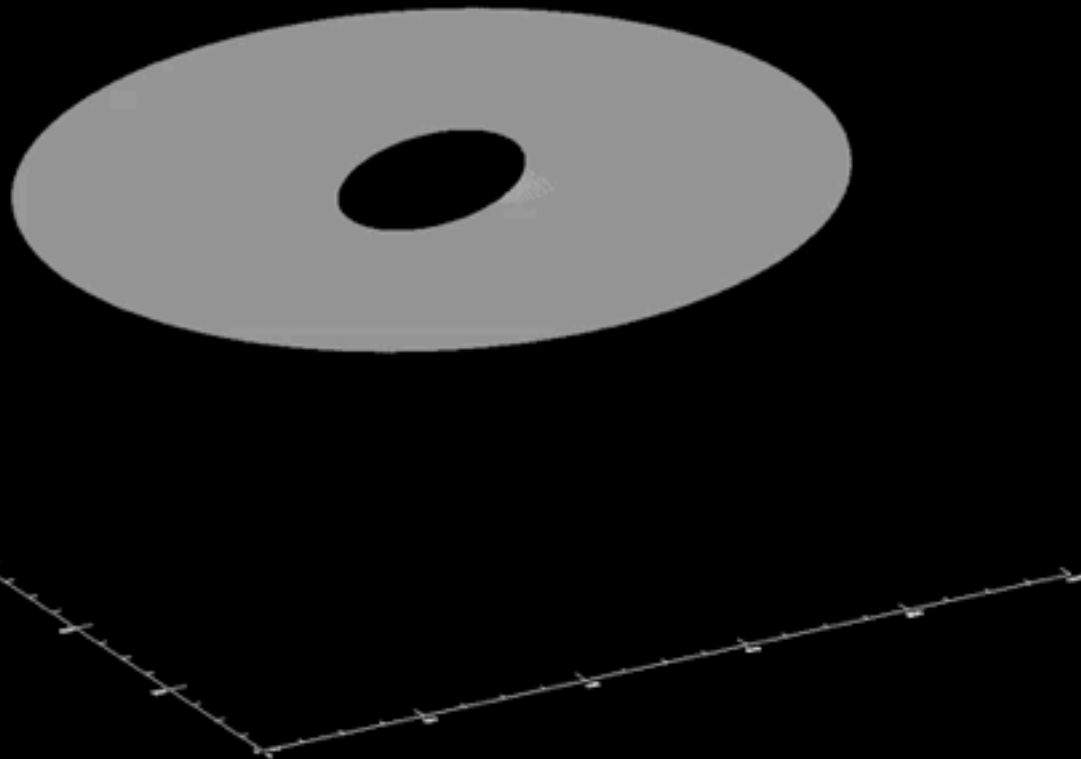
- D72 bewegte sich um 200 km nach innen und wurde erheblich schwächer

# D-Ring





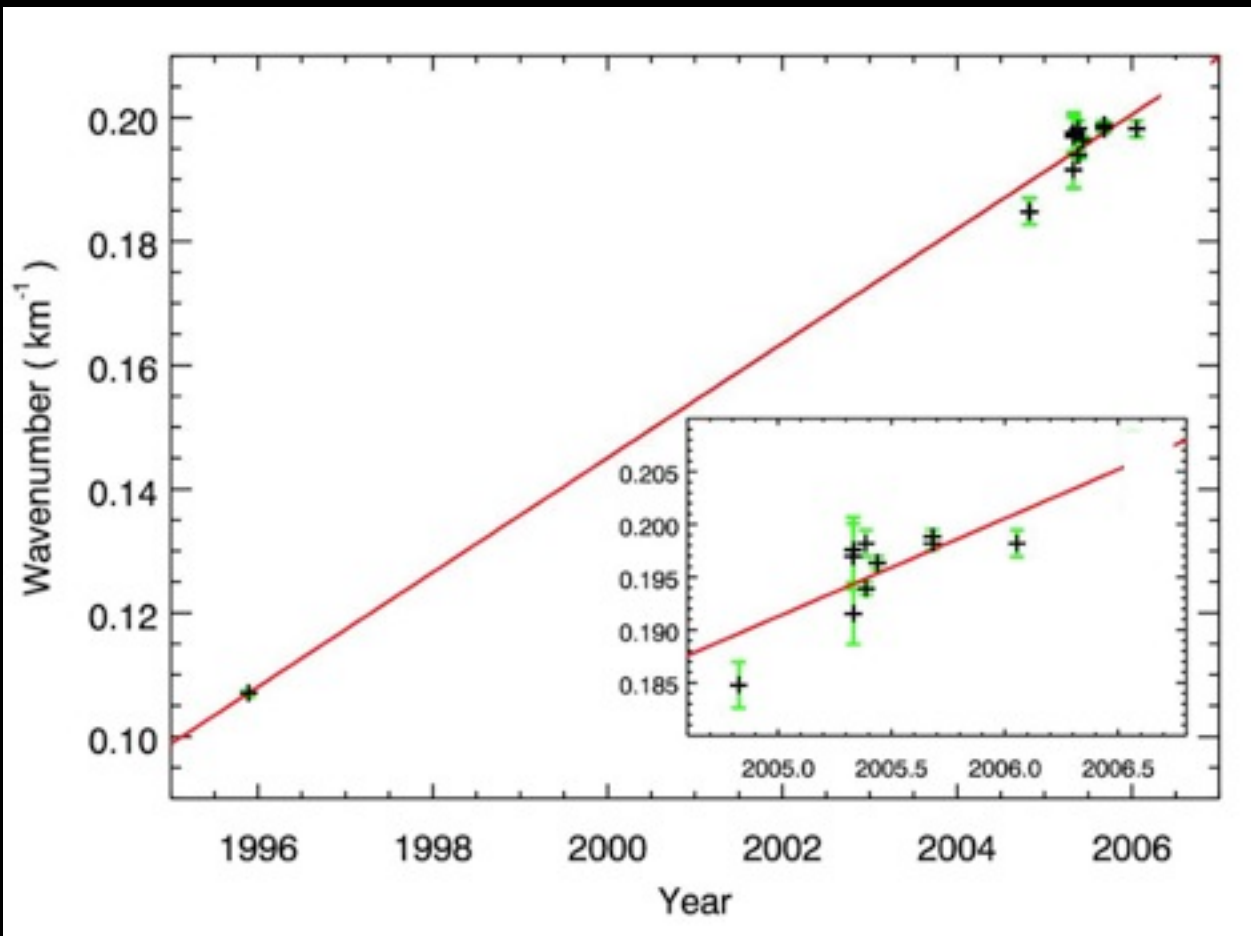
# Erklärungsversuch



- Ring-Bezugsebene wurde innerhalb eines kurzen Zeitraums bezüglich der Saturn-Ringebene „verkippt“
- Störkräfte aufgrund der Abplattung des Saturns bewirken Rotation der Bahnknoten der Ringteilchen
- differentielle Rotation der Ringteilchen bewirkt eine sich aufwindende Spiralstruktur
- Wellenlänge zeitlich abnehmend

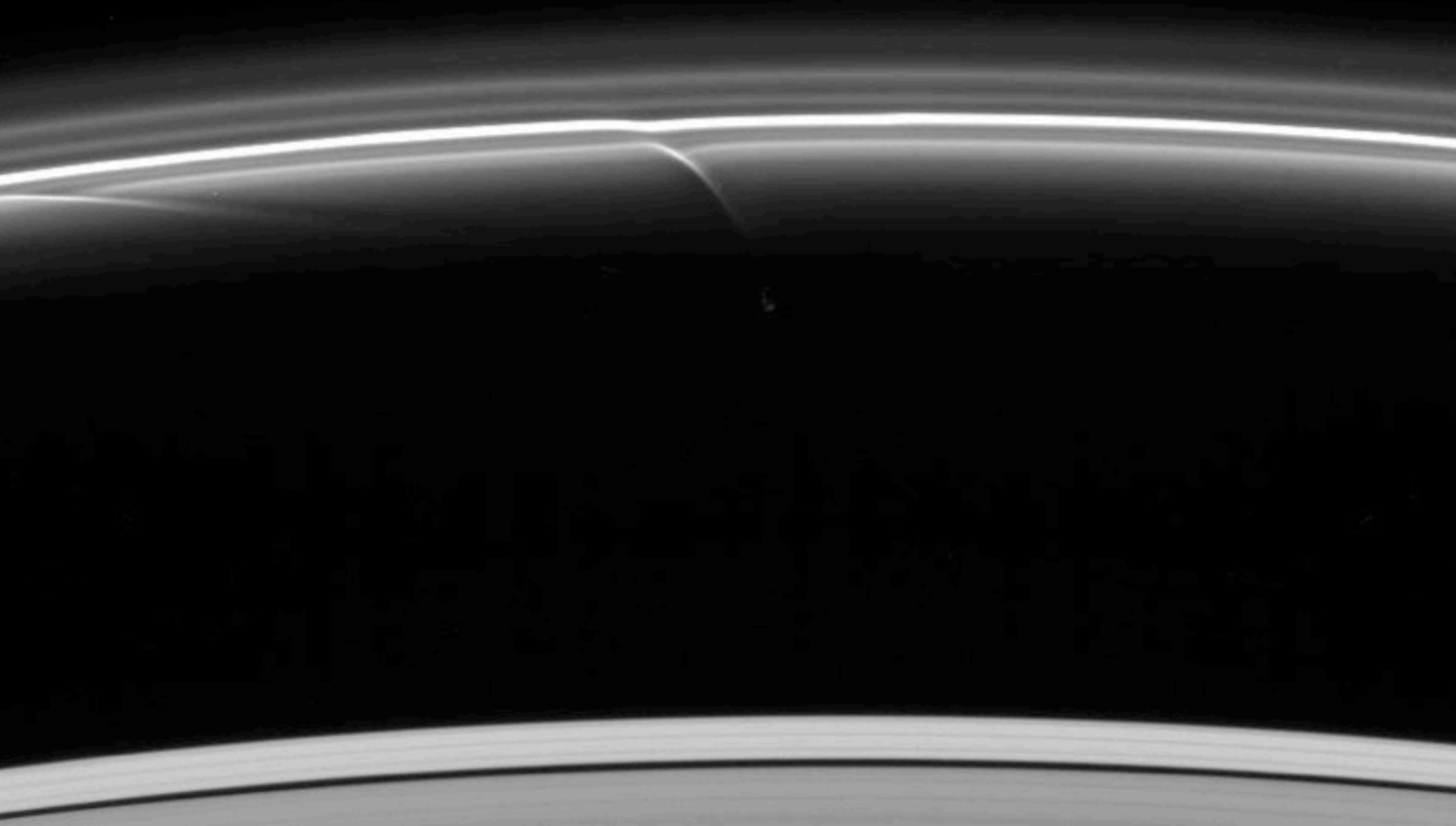
# Modellvorhersagen

Modell sagt sowohl den Zeitpunkt der „Verkipfung“ als auch den Zeitpunkt des Verschwindes der Strukturen vorher



- radiale Wellenzahl  $k \sim \lambda^{-1}$  ist lineare Funktion der Zeit
- Windungsrate  $dk/dt \sim 2.4 \cdot 10^{-5} \text{ km}^{-1} \text{ d}^{-1}$
- $k=0$ : Frühling 1984
- Einschlag eines metergroßen Eisblocks ausreichend

# Der F-Ring



# Schäfer-Monde formen den F-Ring



Pandora (84 km Durchmesser)

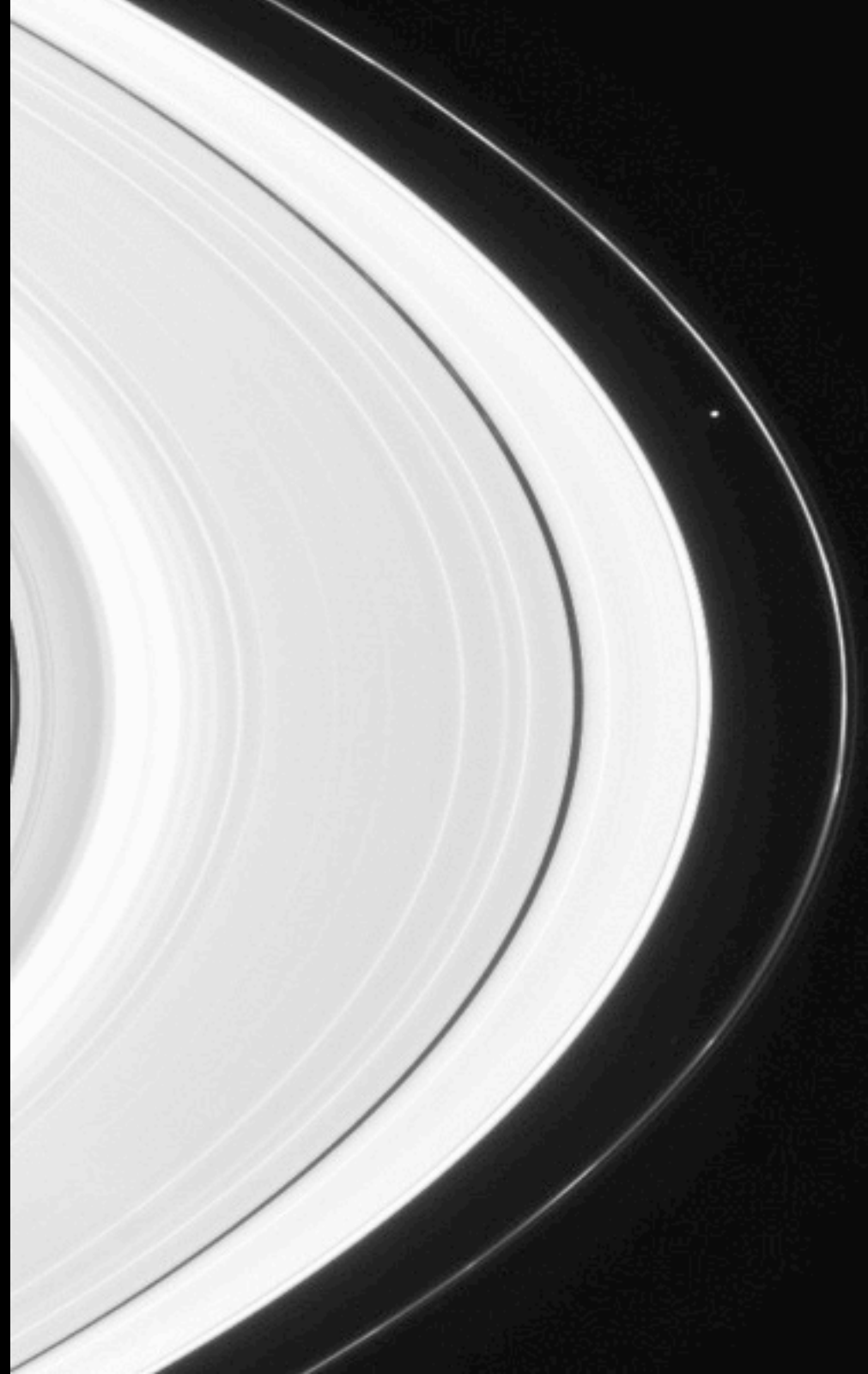
The diagram shows the F-ring of Saturn, which is a narrow ring of ice particles. Two shepherd moons, Pandora and Prometheus, are shown orbiting the ring. Pandora is the inner moon, and Prometheus is the outer moon. The ring is depicted as a narrow, bright band between two parallel lines representing the ring's boundaries. The moons are shown as small, bright, irregularly shaped objects. The background is black, and the ring and moons are white.

Prometheus (102 km Durchmesser)

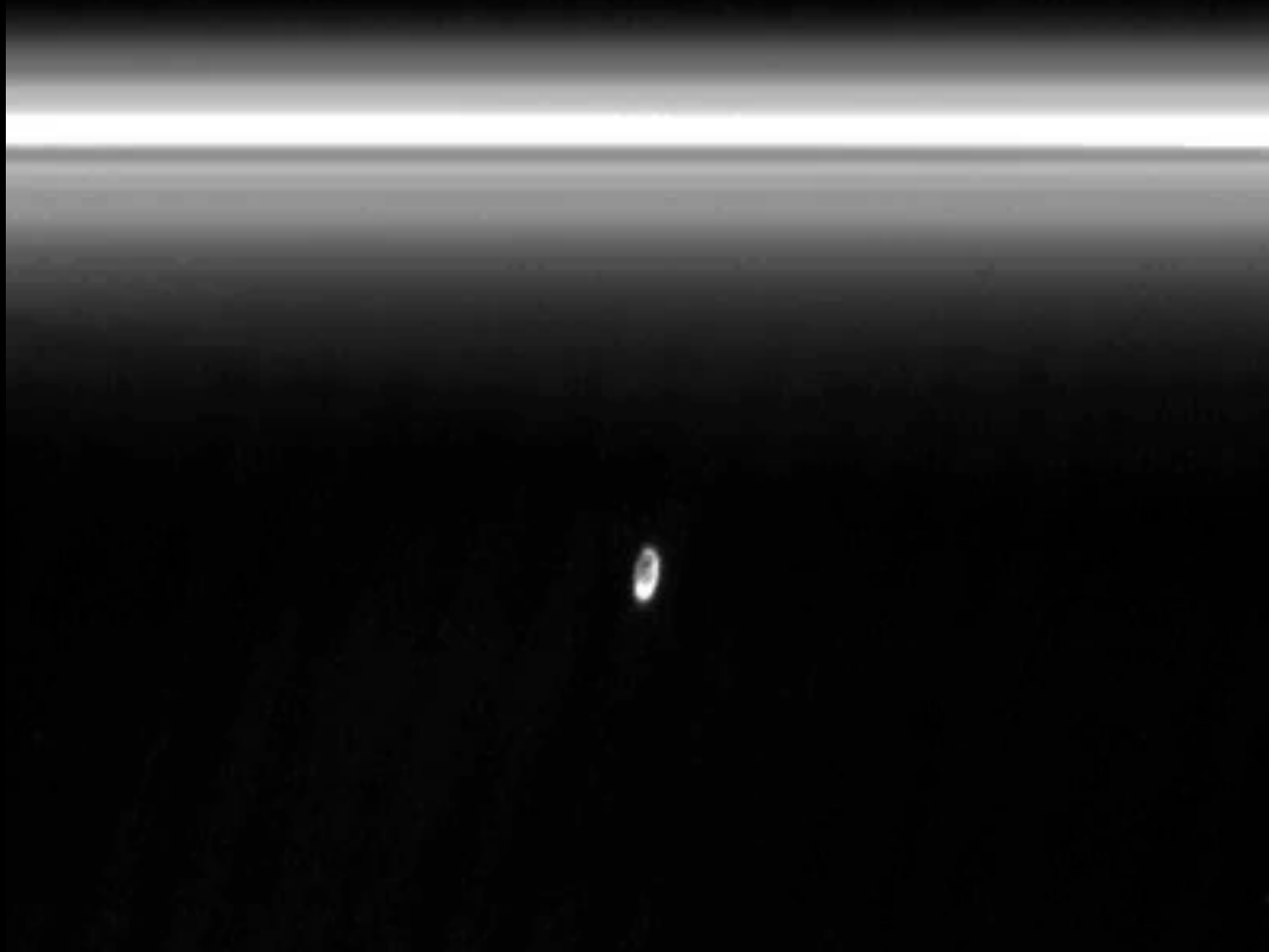


# Hirten-Monde bei der Arbeit

- Ringmaterial zwischen den Bahnen zweier dicht benachbarter Ringmonde wird zu einem dünnen Ring verdichtet
- „inverse“ Ringlücke



# Der „Prometheus“-Effekt



# Der „Prometheus“-Effekt

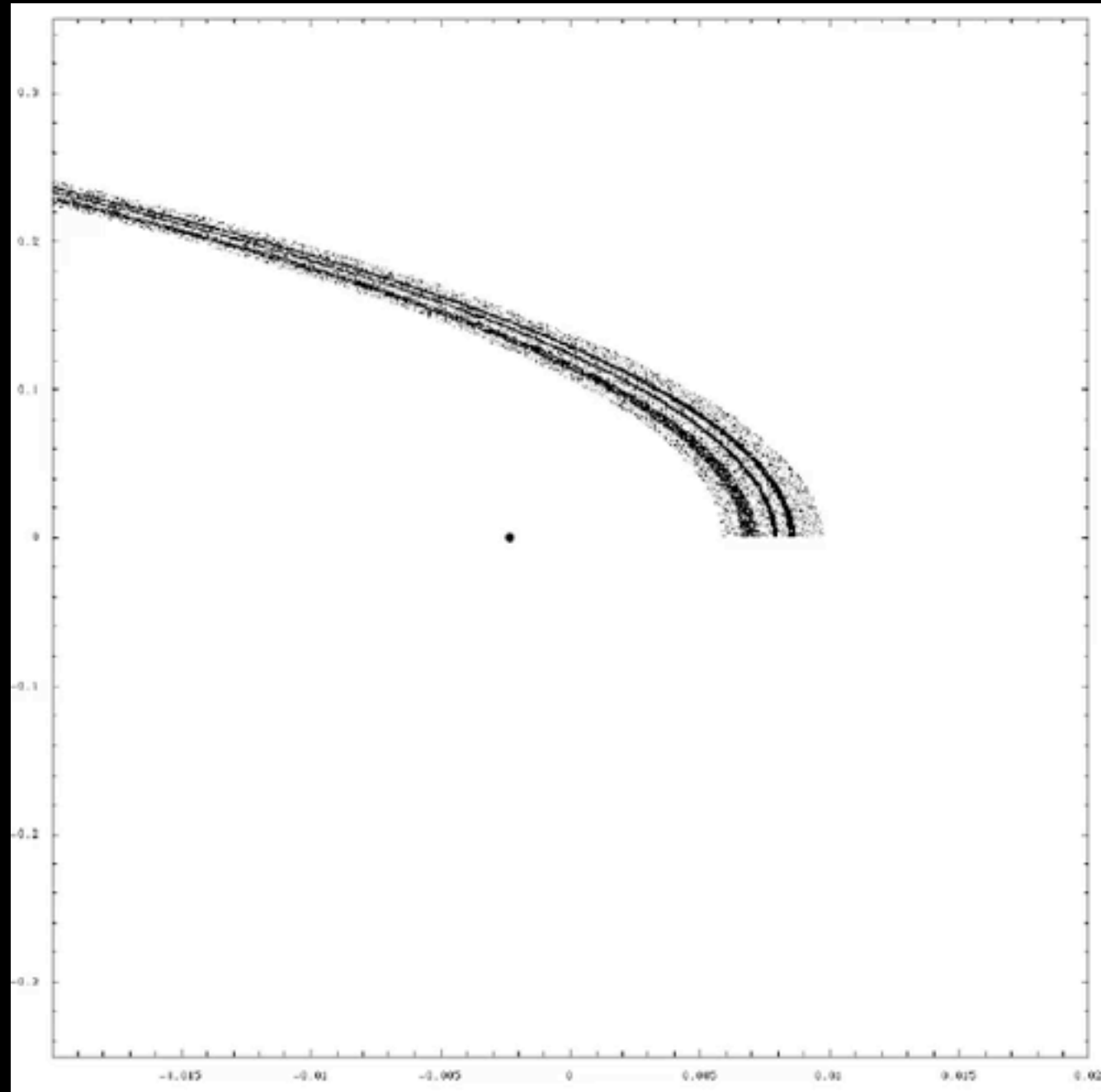
- aufgrund seiner exzentrischen Bahn nähert sich der innere Mond Prometheus alle 14.7 Stunden den F-Ring
- Gravitation des Mondes erzeugt „Kanäle“ im F-Ring
- innere Ringteilchen bewegen sich langsamer relativ zu Prometheus als äußere Teilchen: „Scheerkraft“



horizontal: 147 000 km ( $60^\circ$ )

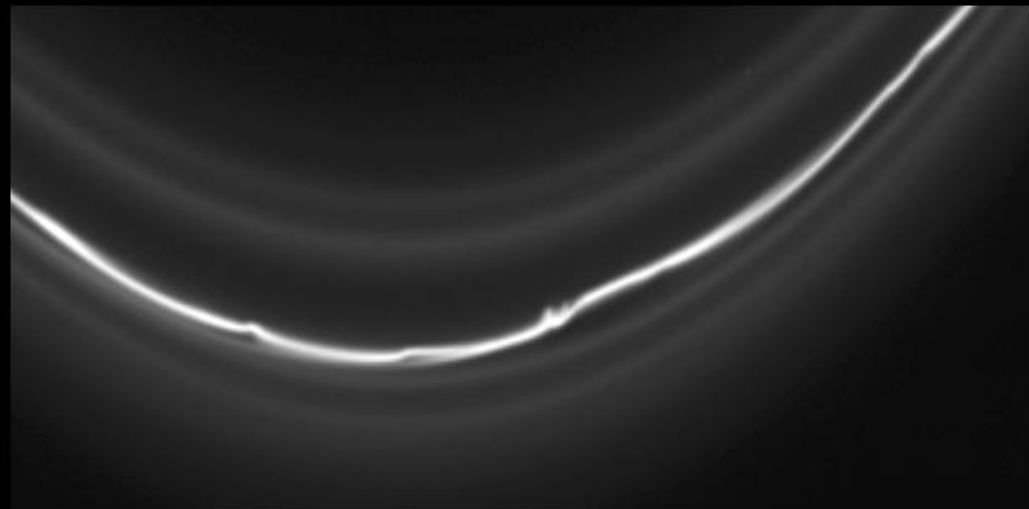
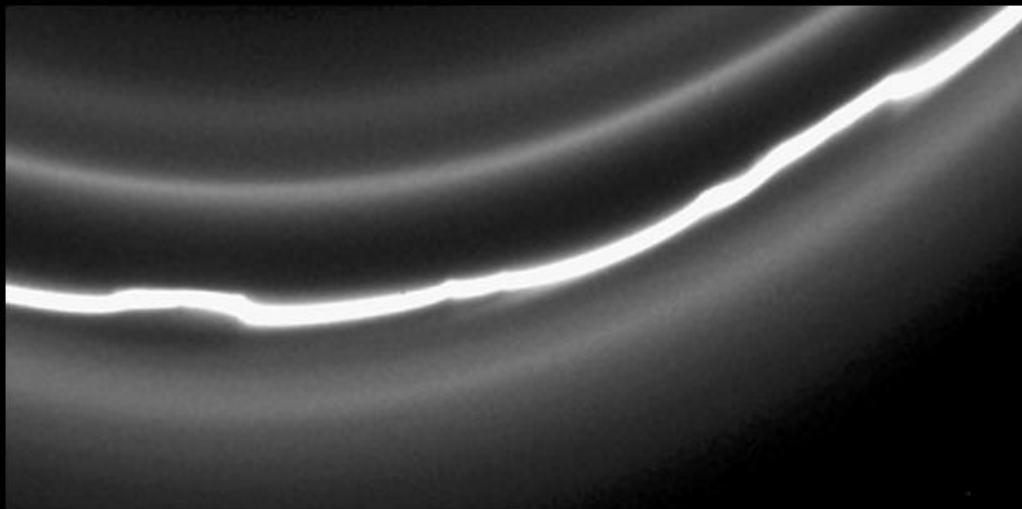
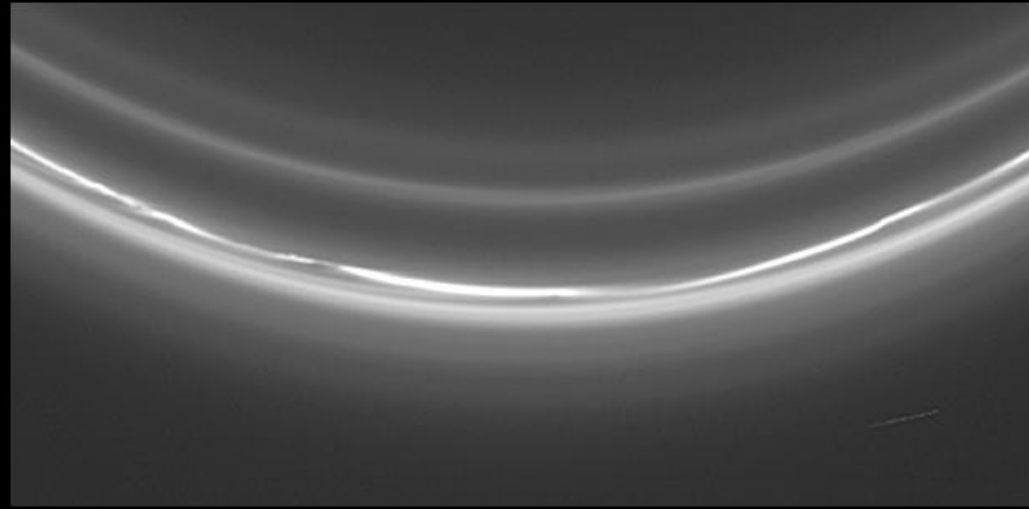
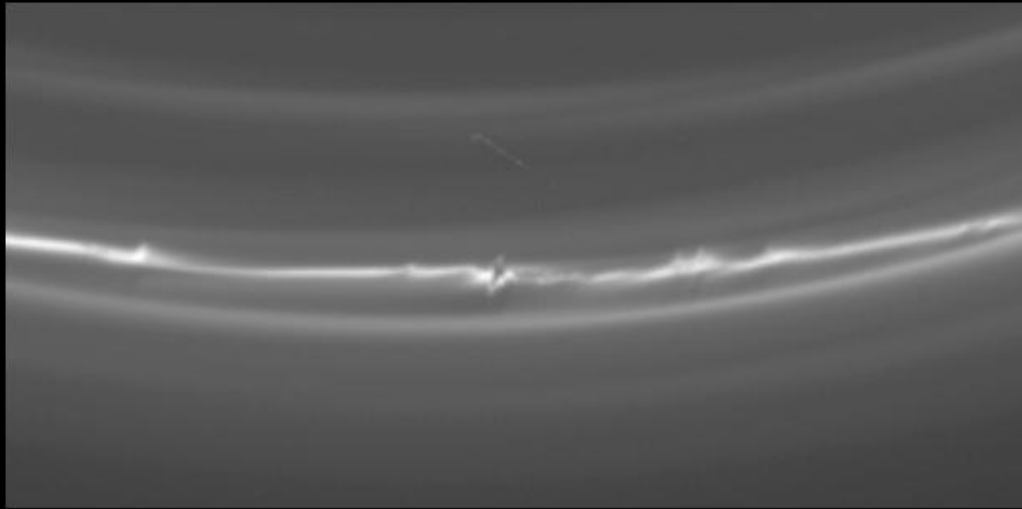
vertikal: 1500 km

# Simulation der Kanal- bildung

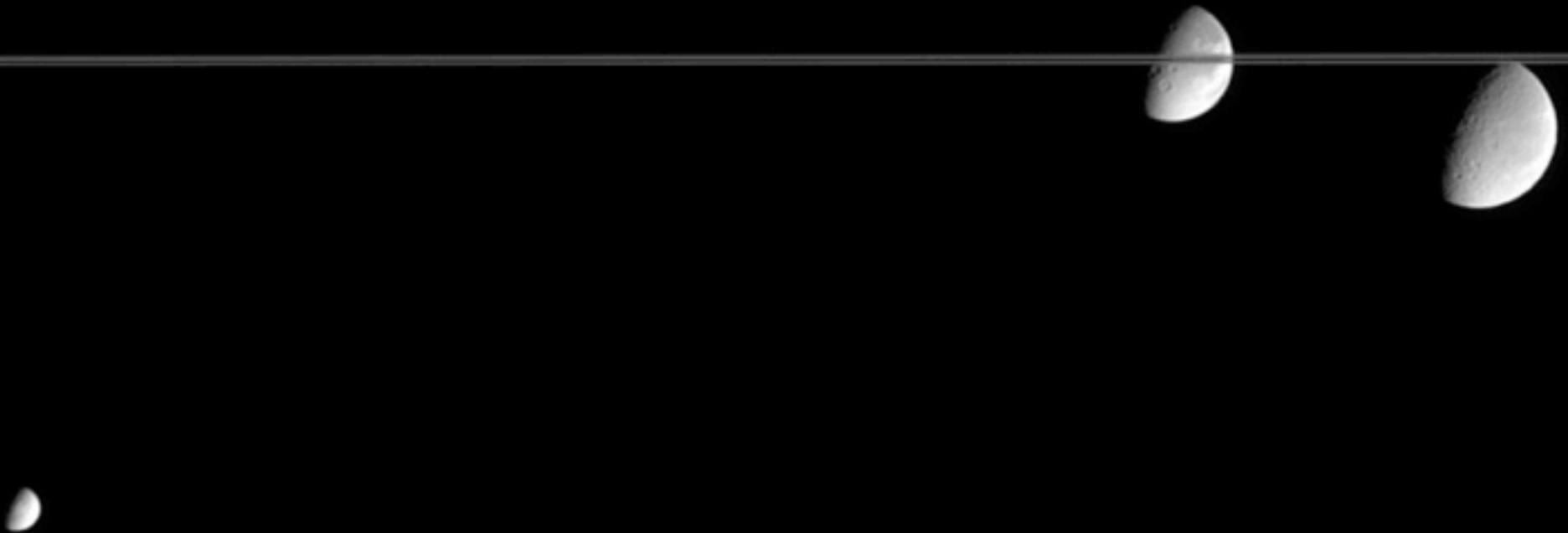




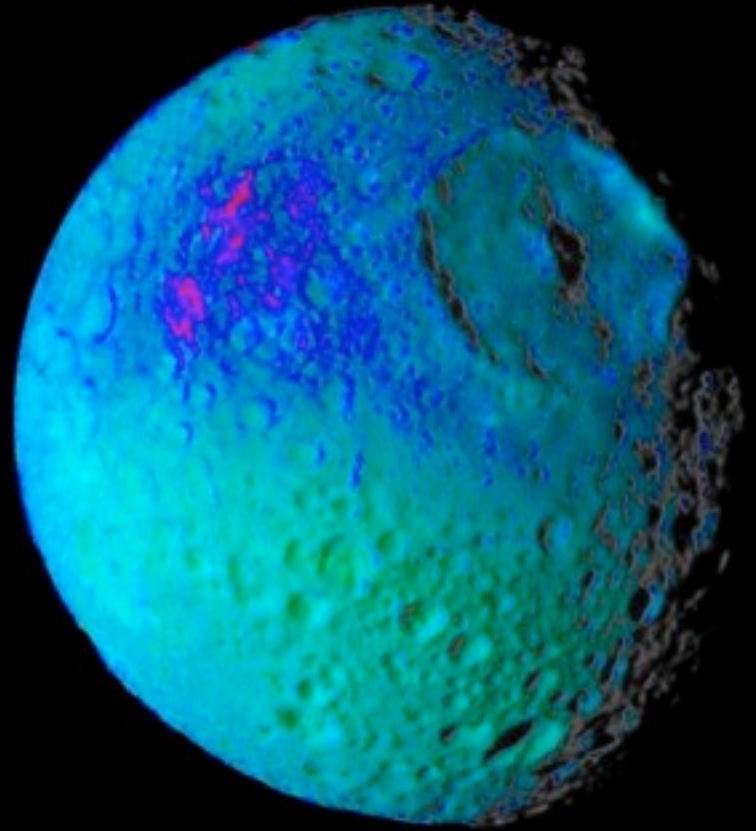
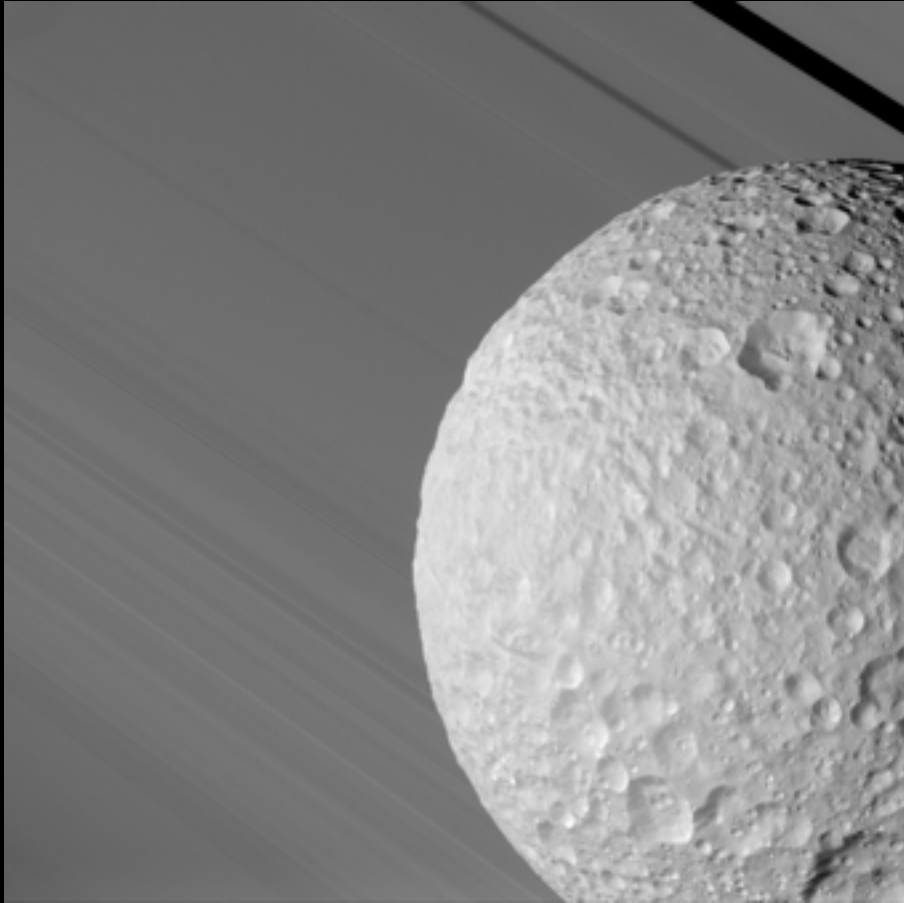
# Hirten-Monde erzeugen Knoten und Verbiegungen in den Strängen



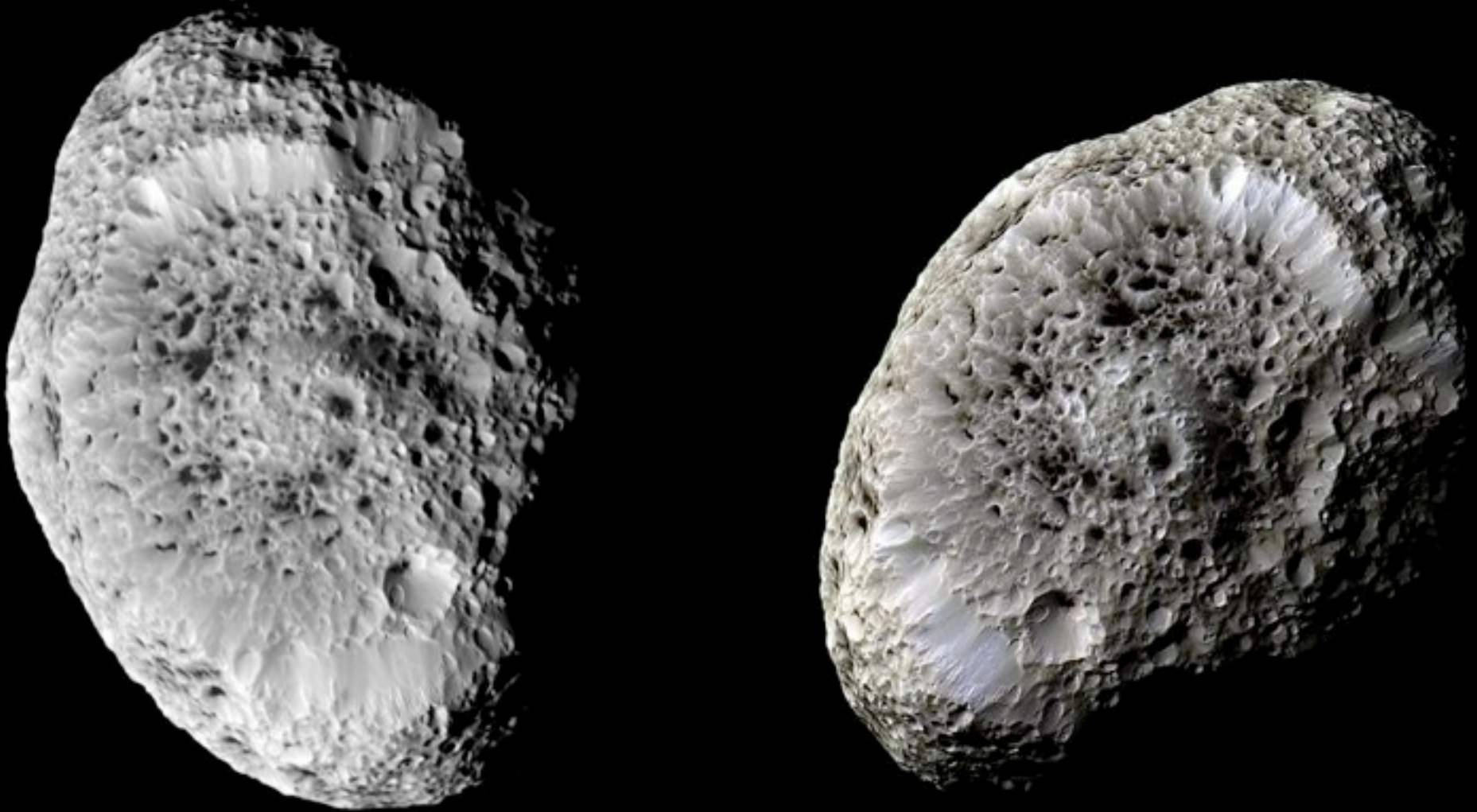
# Die Monde



# Mimas

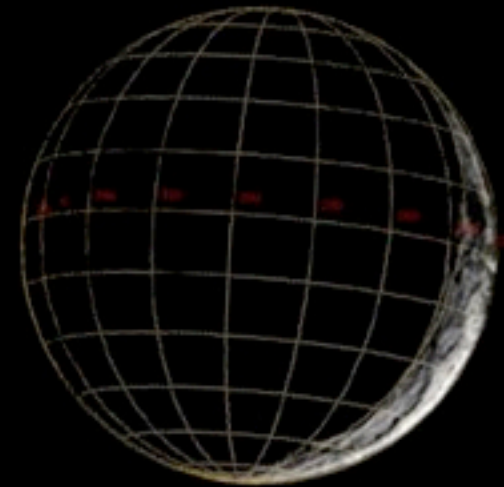
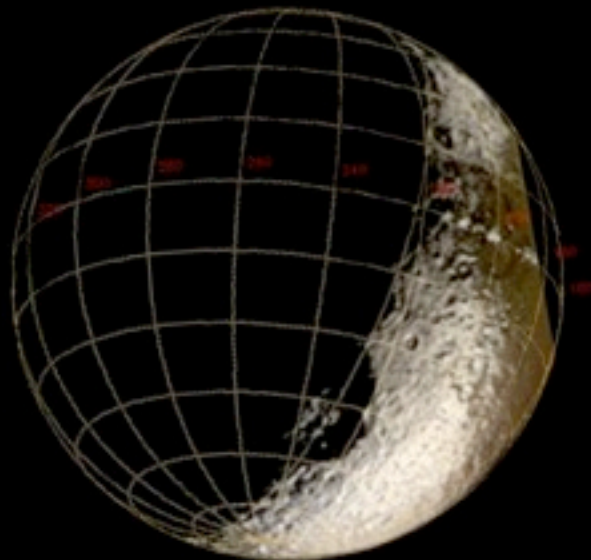
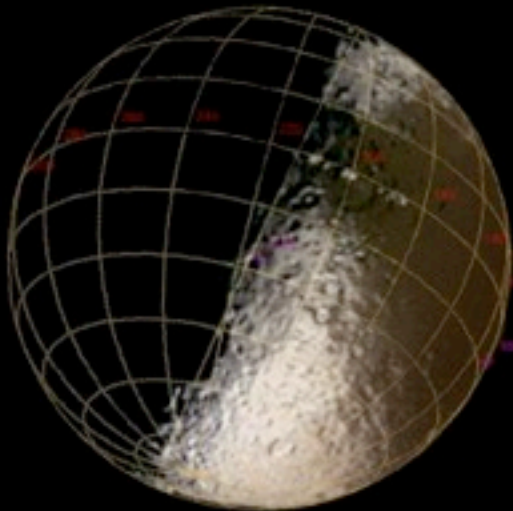


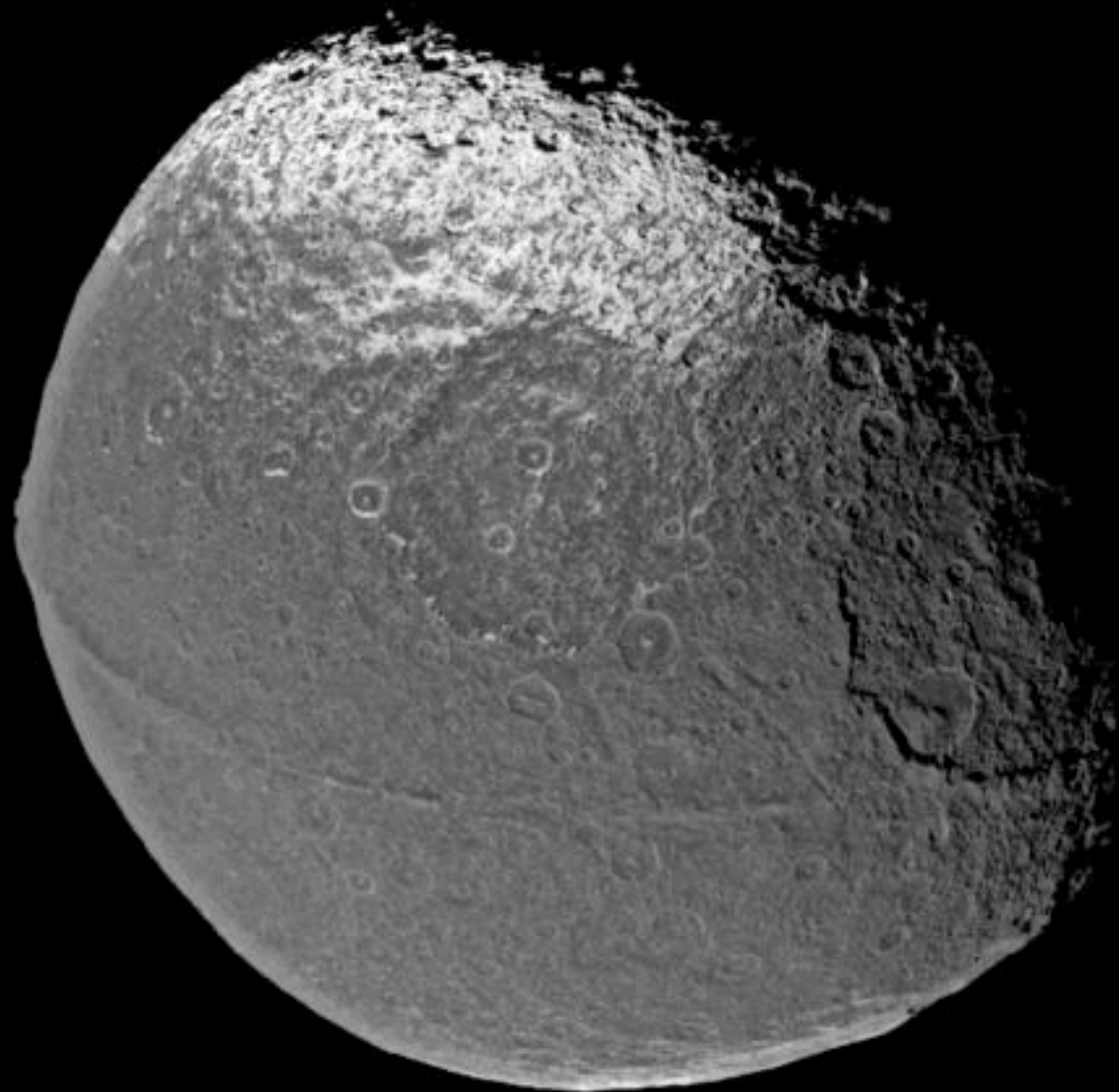
# Hyperion

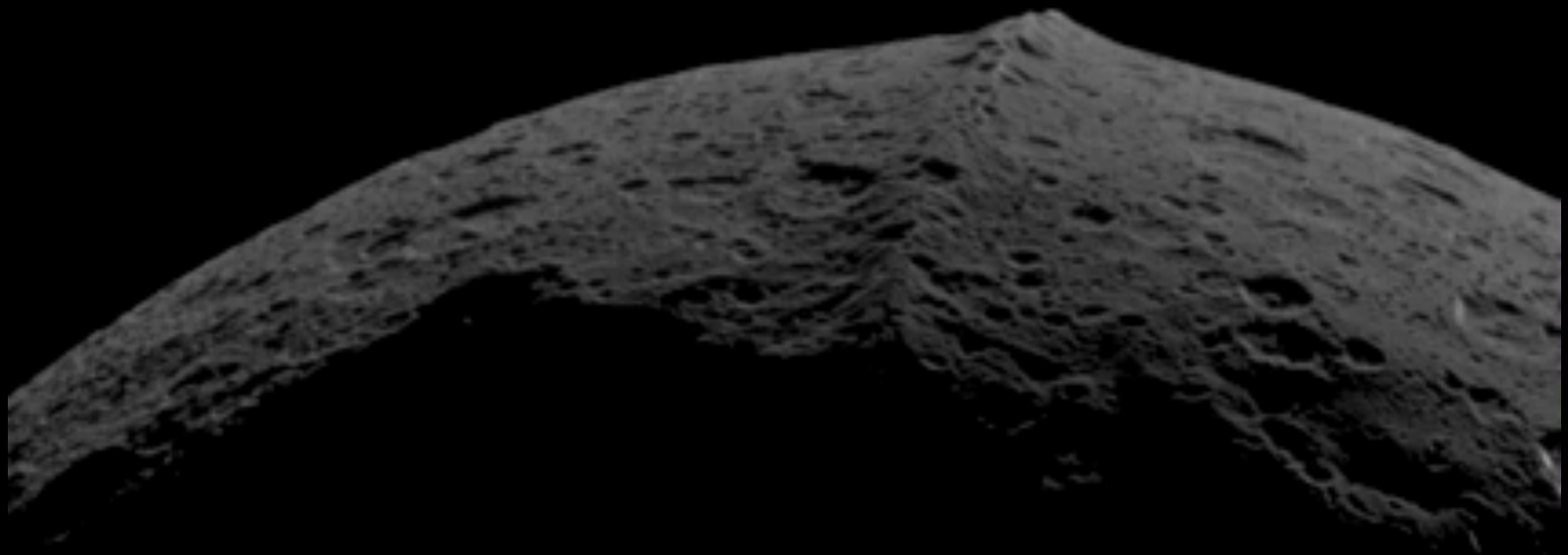




# Iapetus





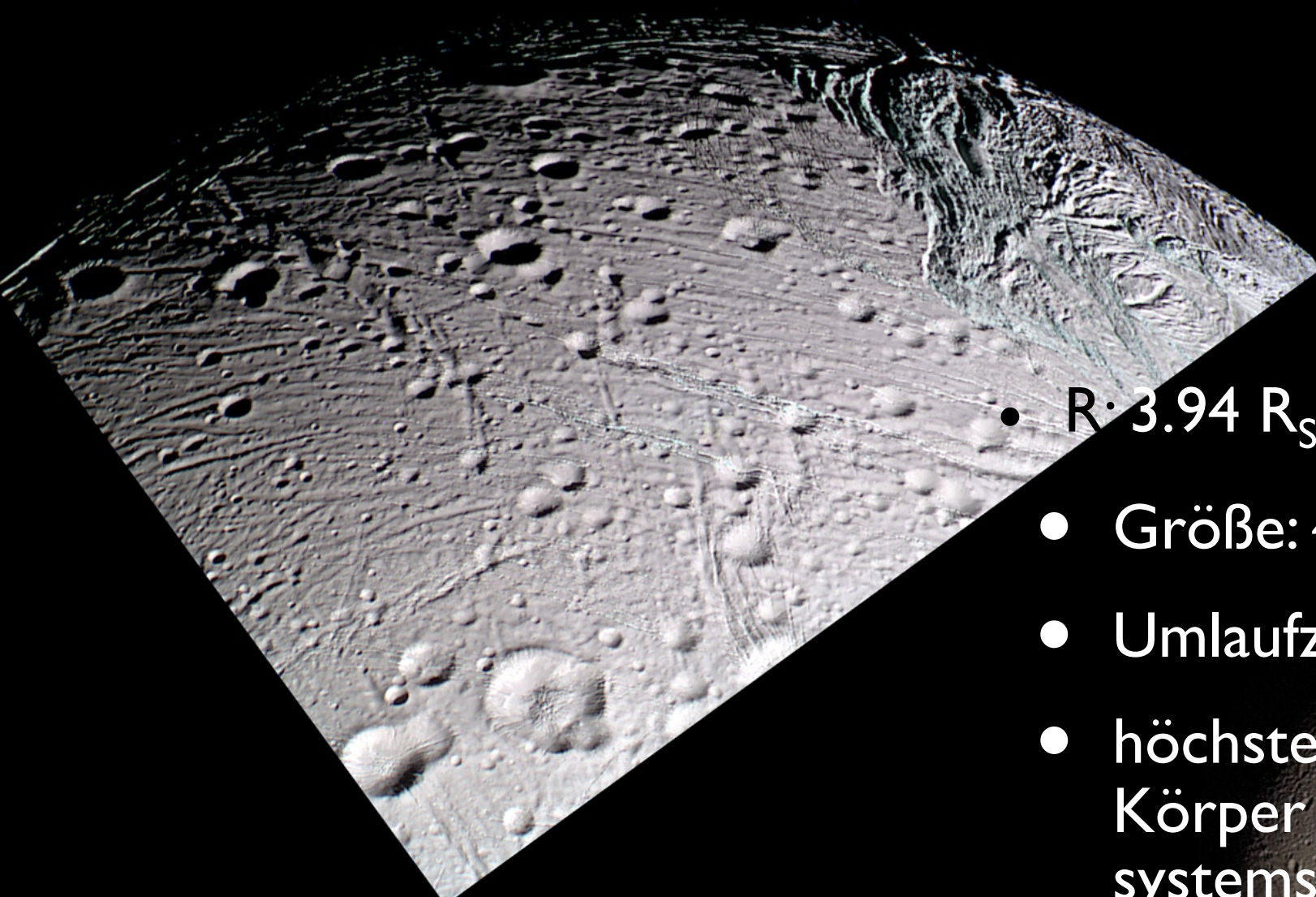




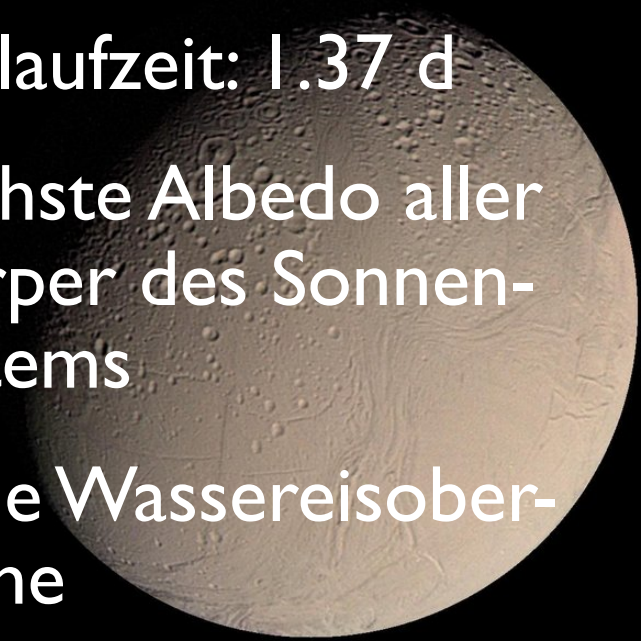
# Wasser auf Enceladus die Geschichte einer Entdeckung



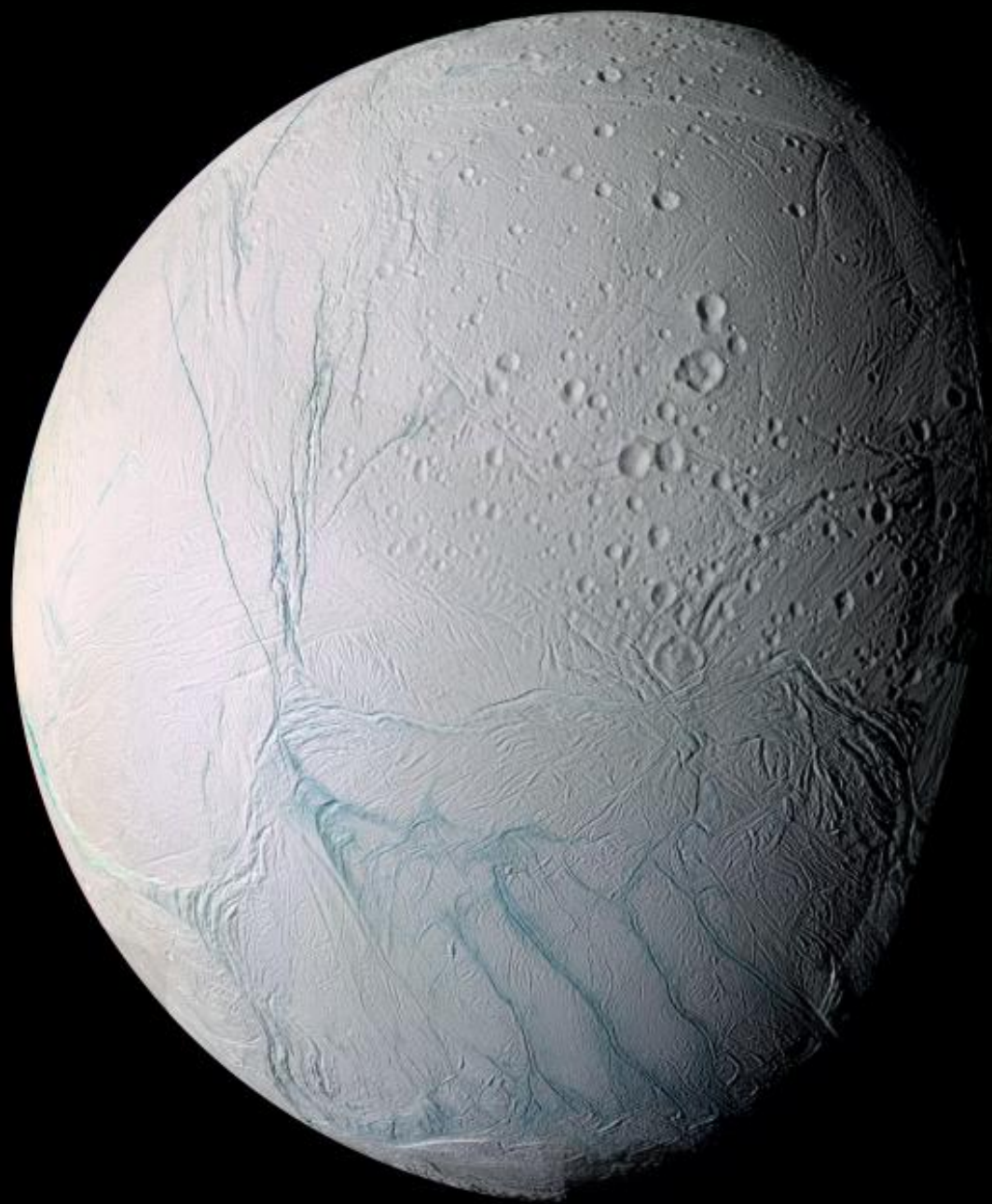
# Enceladus

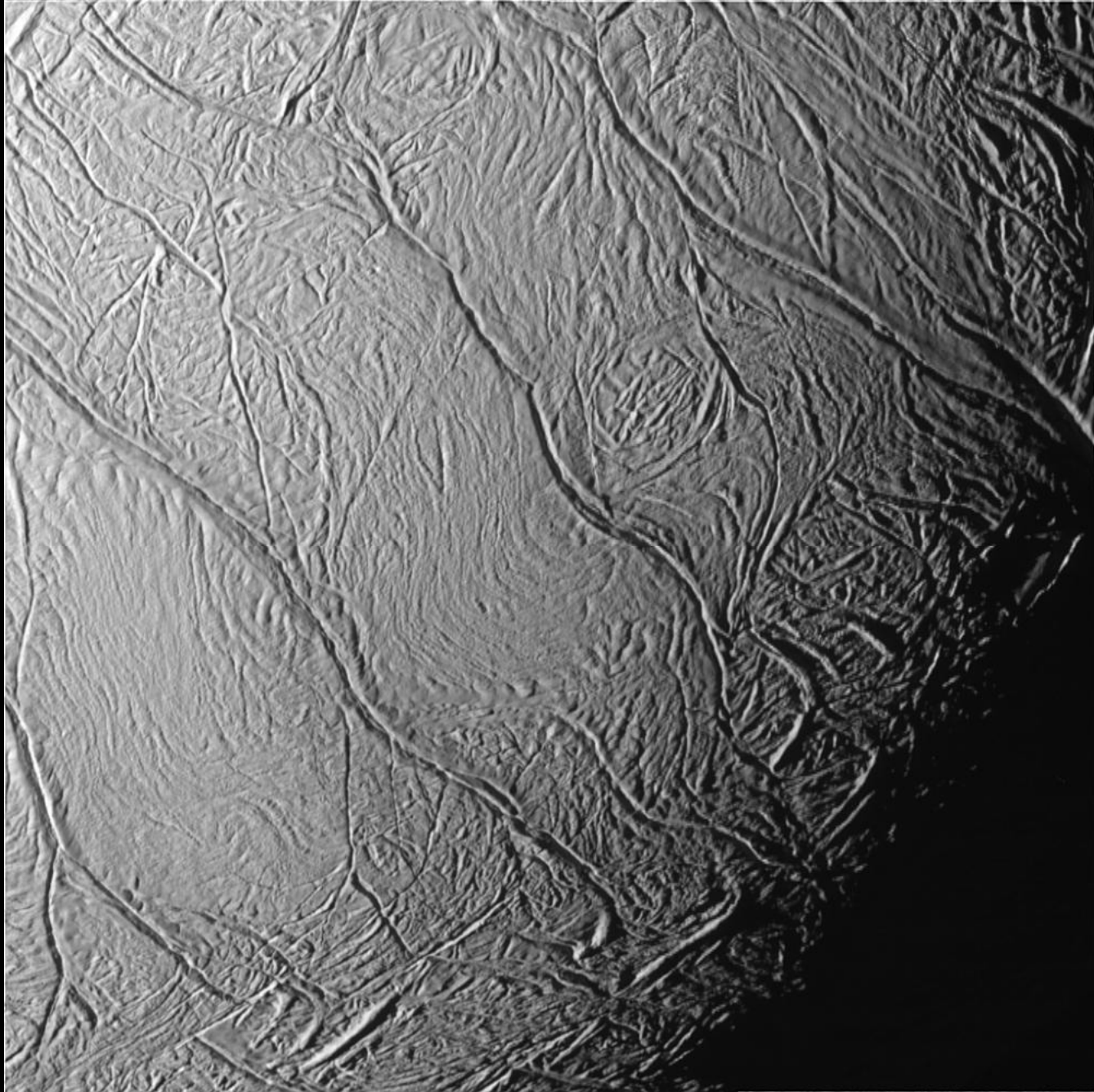


- $R = 3.94 R_S$
- Größe: 499 km
- Umlaufzeit: 1.37 d
- höchste Albedo aller Körper des Sonnensystems
- reine Wassereisoberfläche

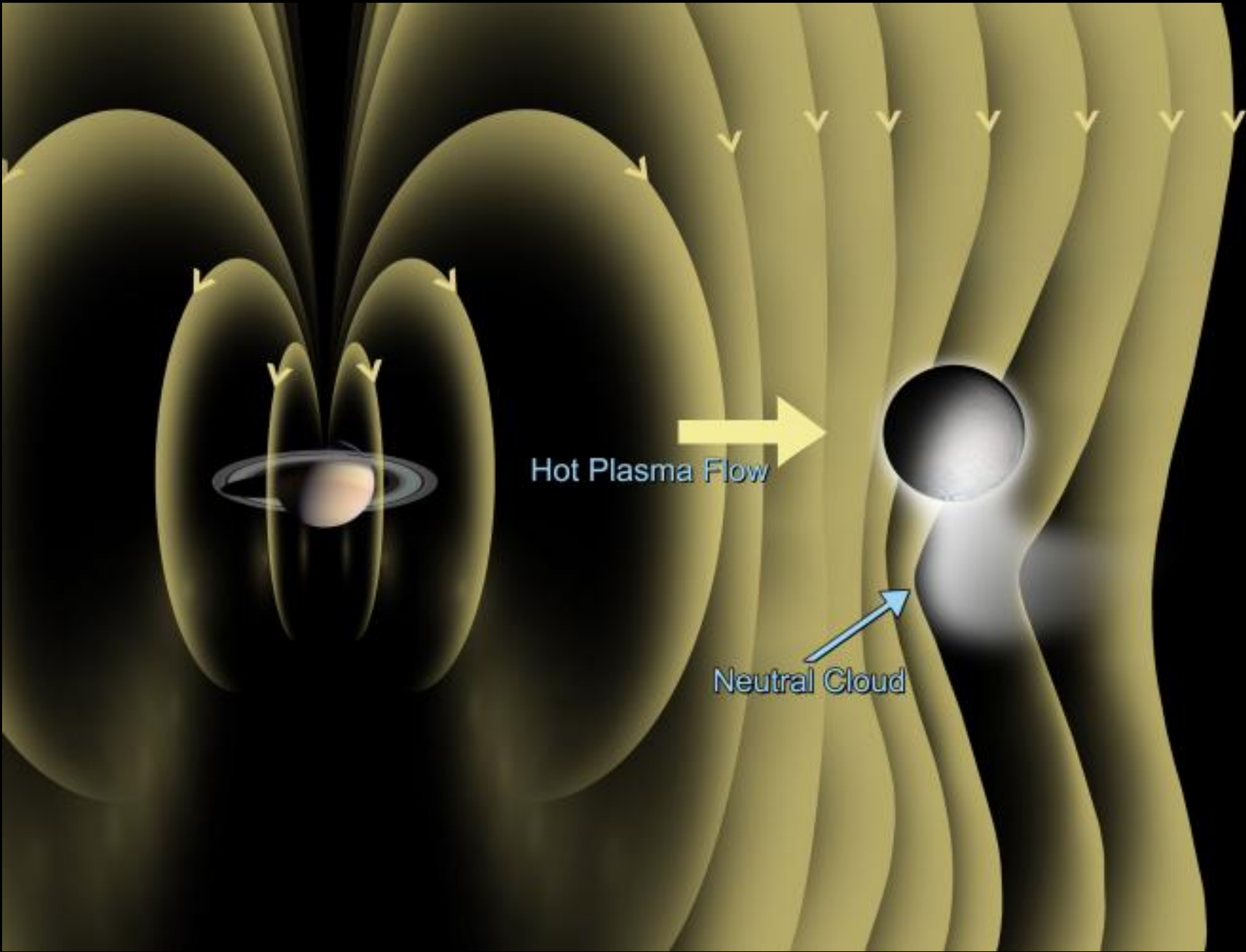




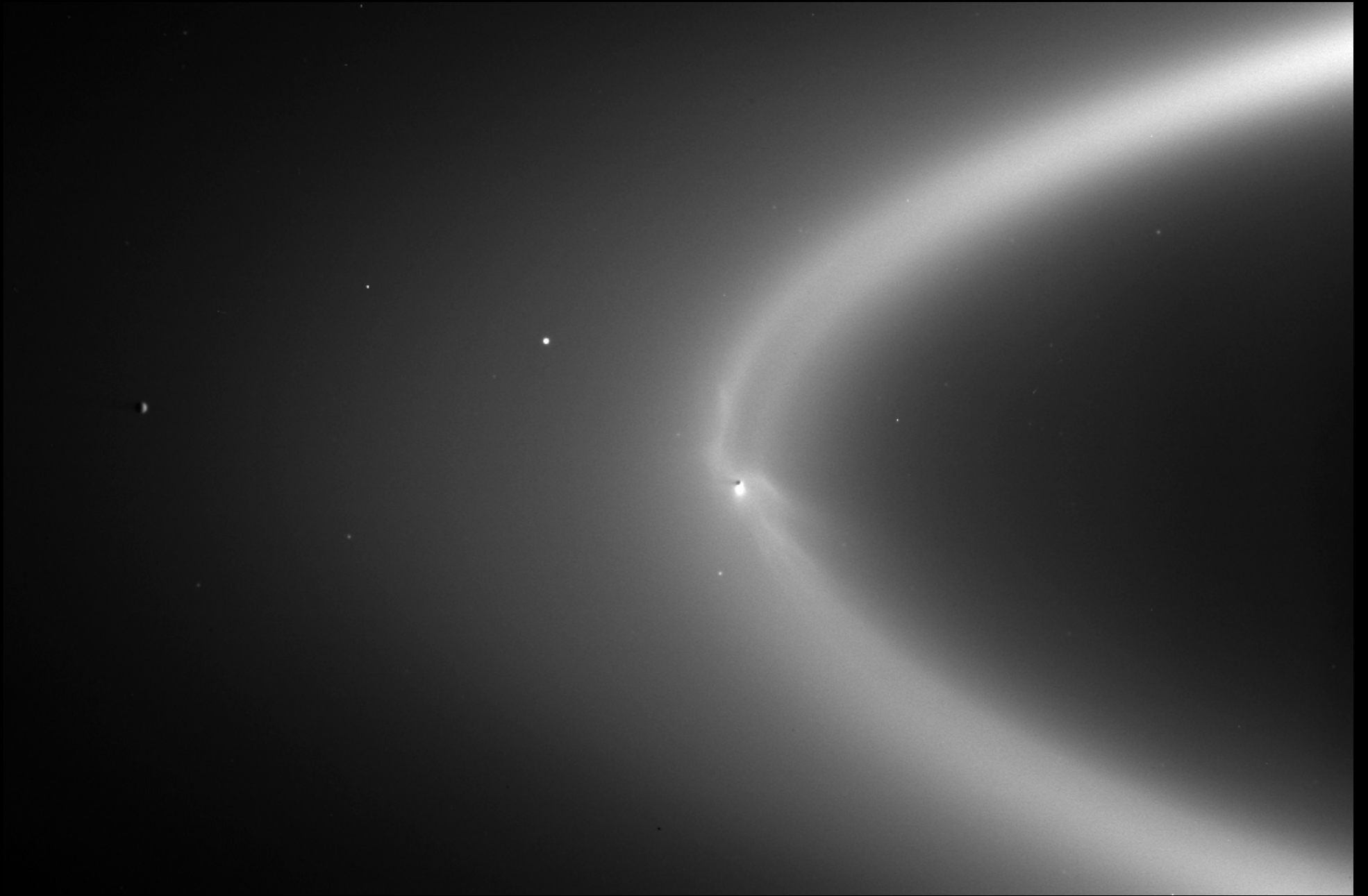




# Anomalie im magnetischen Feld

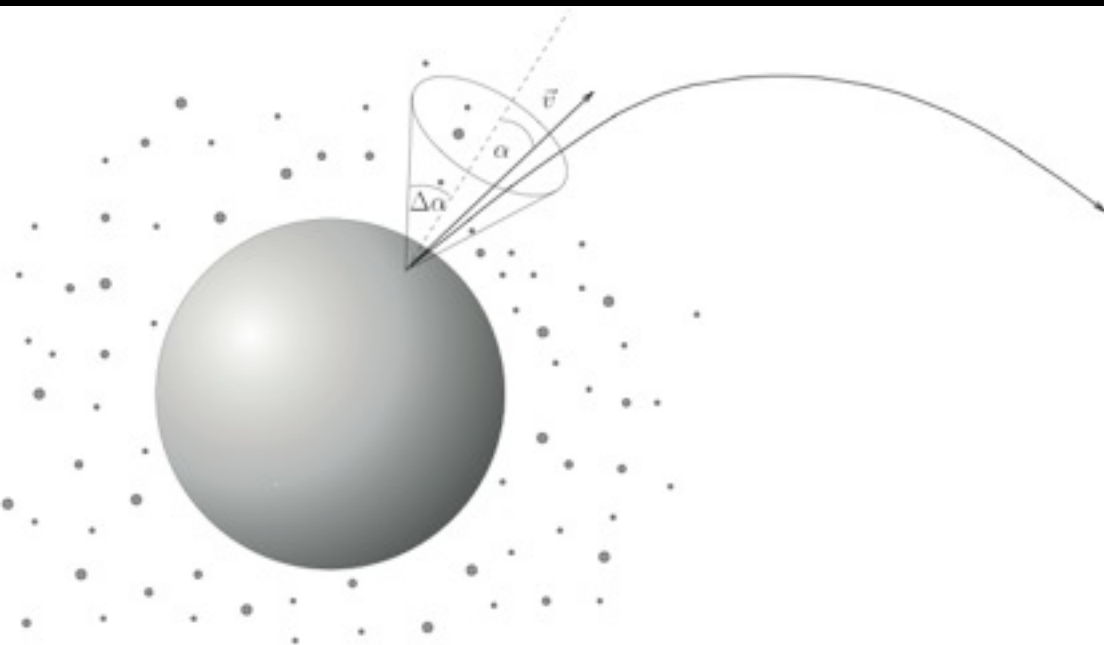


# Enceladus ist Quelle des E-Ring



# Wie wird der Staub erzeugt?

Mikrometeoriteneinschläge auf die Mondoberfläche erzeugen zahlreiche Ejekta-Teilchen

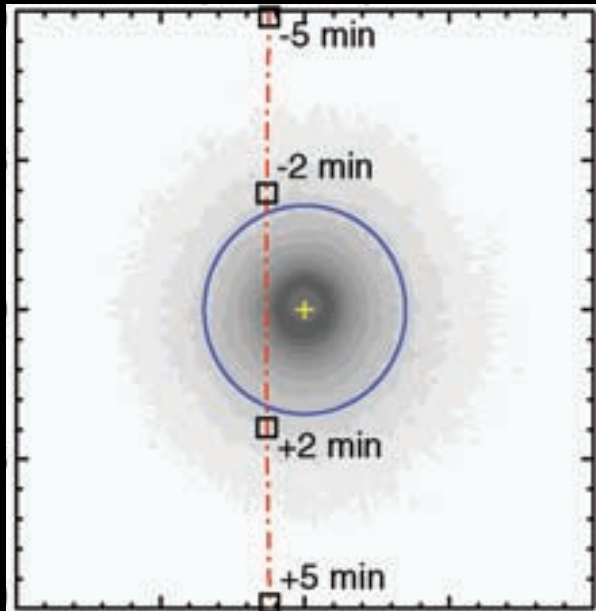


- einige Ejekta entweichen aus dem Gravitationsfeld des Monds und frischen das Ringteilchenreservoir auf.  
(Horanyi et al., Icarus, 1992)
- Gravitativ gebundene Teilchen bilden näherungsweise eine isotrope Staubwolke um den Mond (beobachtet für die Galileischen Monde  
(Krüger et al., Nature, 1999))

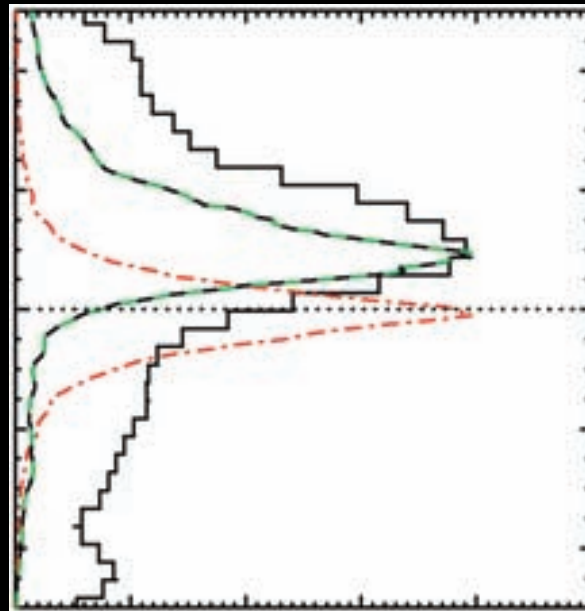


# Staubdaten

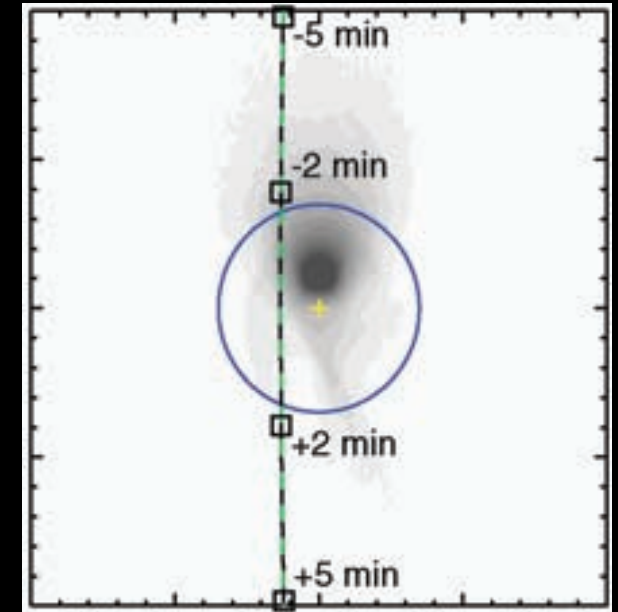
Staubhülle



Staub-Detektor



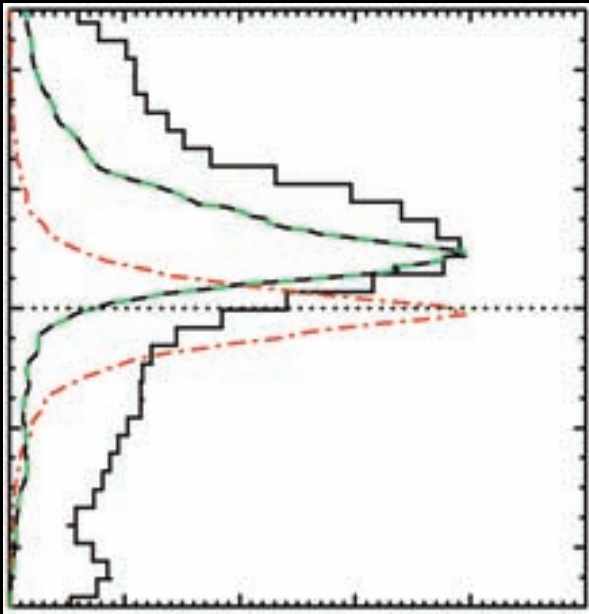
Staub-Geysir



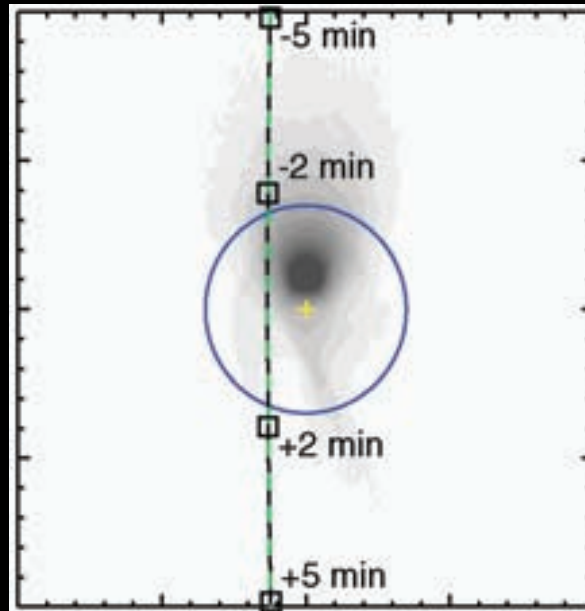
Spahn et al., Science, 311, 2006

# Staubdaten

Staub-Detektor



Staub-Geysir



Spahn et al., Science, 311, 2006

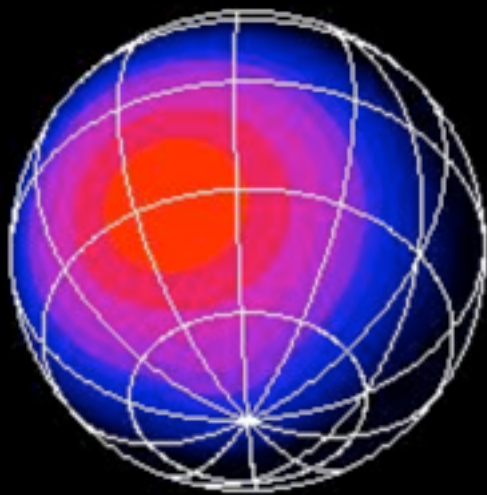
Bild



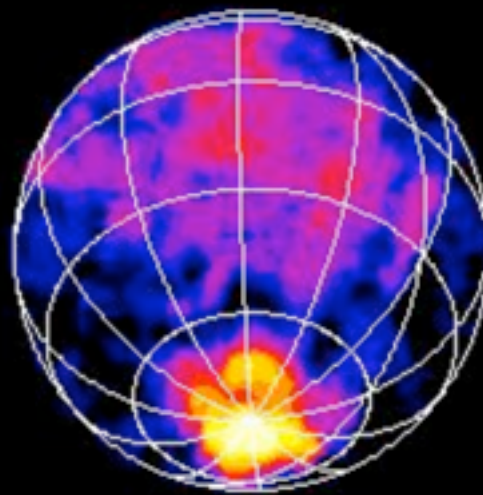
NASA/JPL/Space Science Inst.

# Hinweise auf aktive Südpolregion

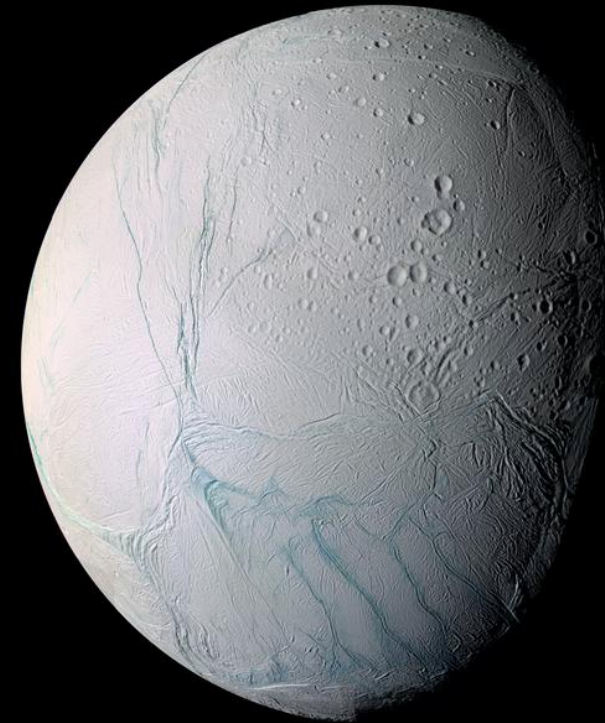
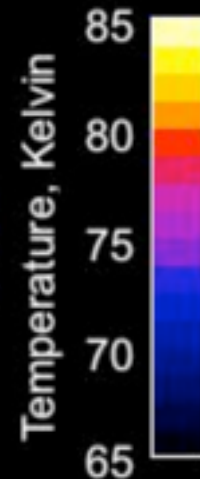
Spencer et al., Science, 2006



Predicted  
Temperatures



Observed  
Temperatures



Porco et al., Science, 2006

- (neutrales) Wassergas (Dougherty et al, Hansen et al., Science 2006)
- H<sub>2</sub>O-Maximalrate 30 s bevor dichtester Annäherung (Waite et al., Science



# Wärmeproduktion



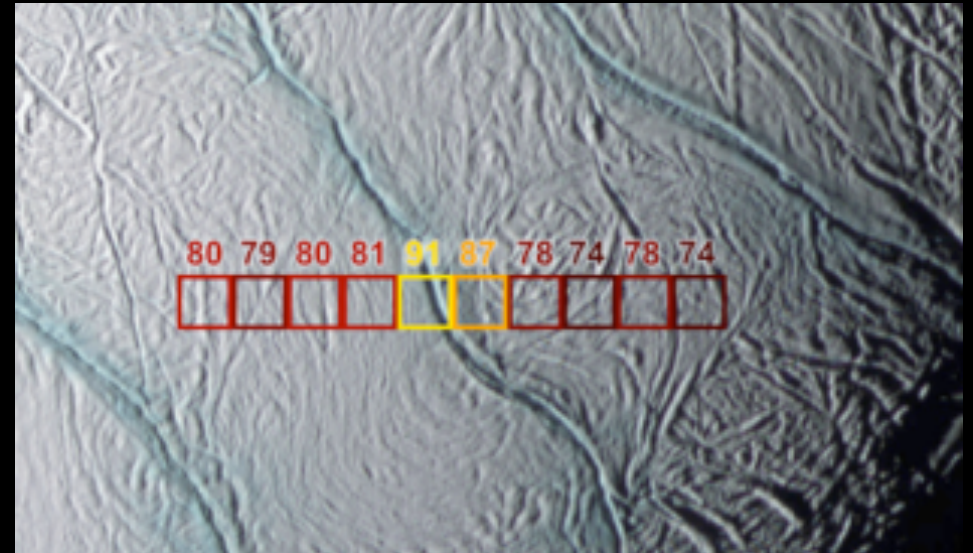
Erde  
87 mW/m<sup>2</sup>



Enceladus  
Südpol  
250 mW/m<sup>2</sup>



Yellowstone  
2500 mW/m<sup>2</sup>



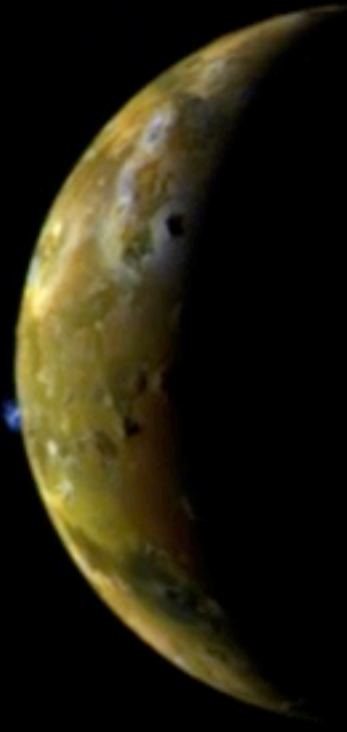
Tigerstripfen  
13,000 mW/m<sup>2</sup>

# Vulkanische Körper

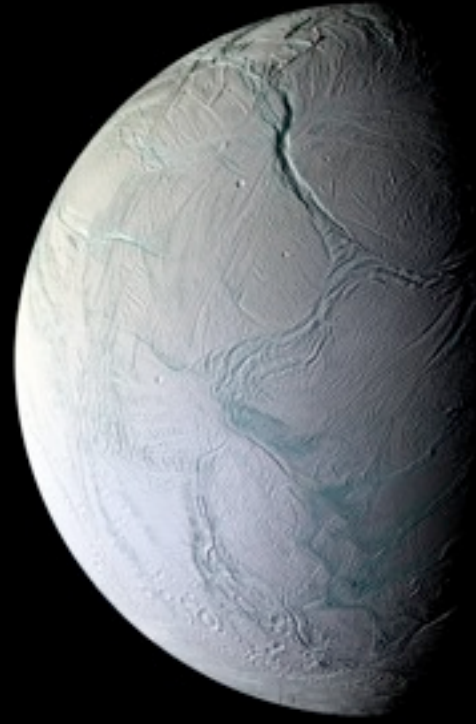
Earth



Io



Enceladus



Triton



Jupiter-System

Saturn-System

Neptun-System



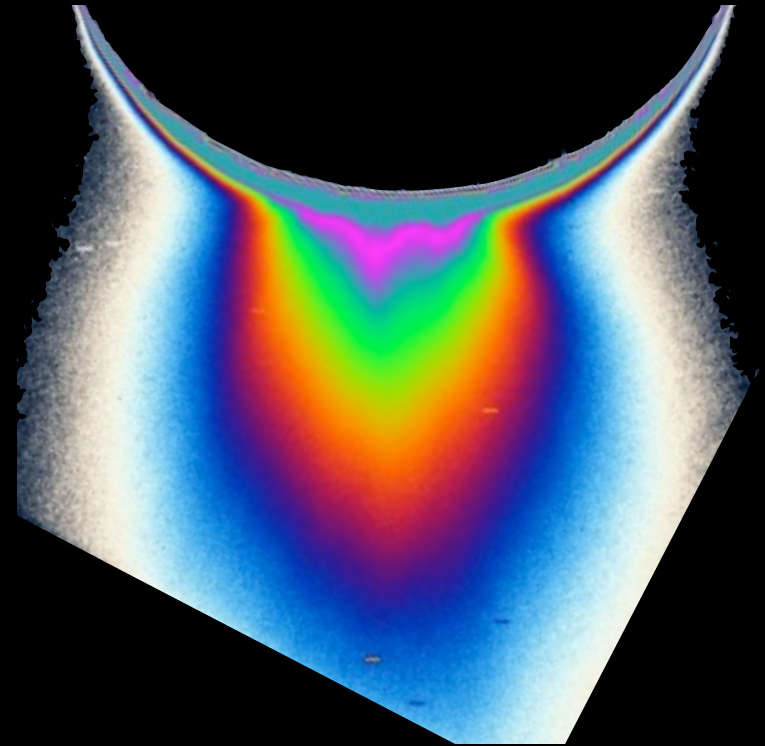
# Geysir-Teilchen langsamer als Fluchtgeschwindigkeit



Teilchengröße

$\sim 5\mu\text{m}$

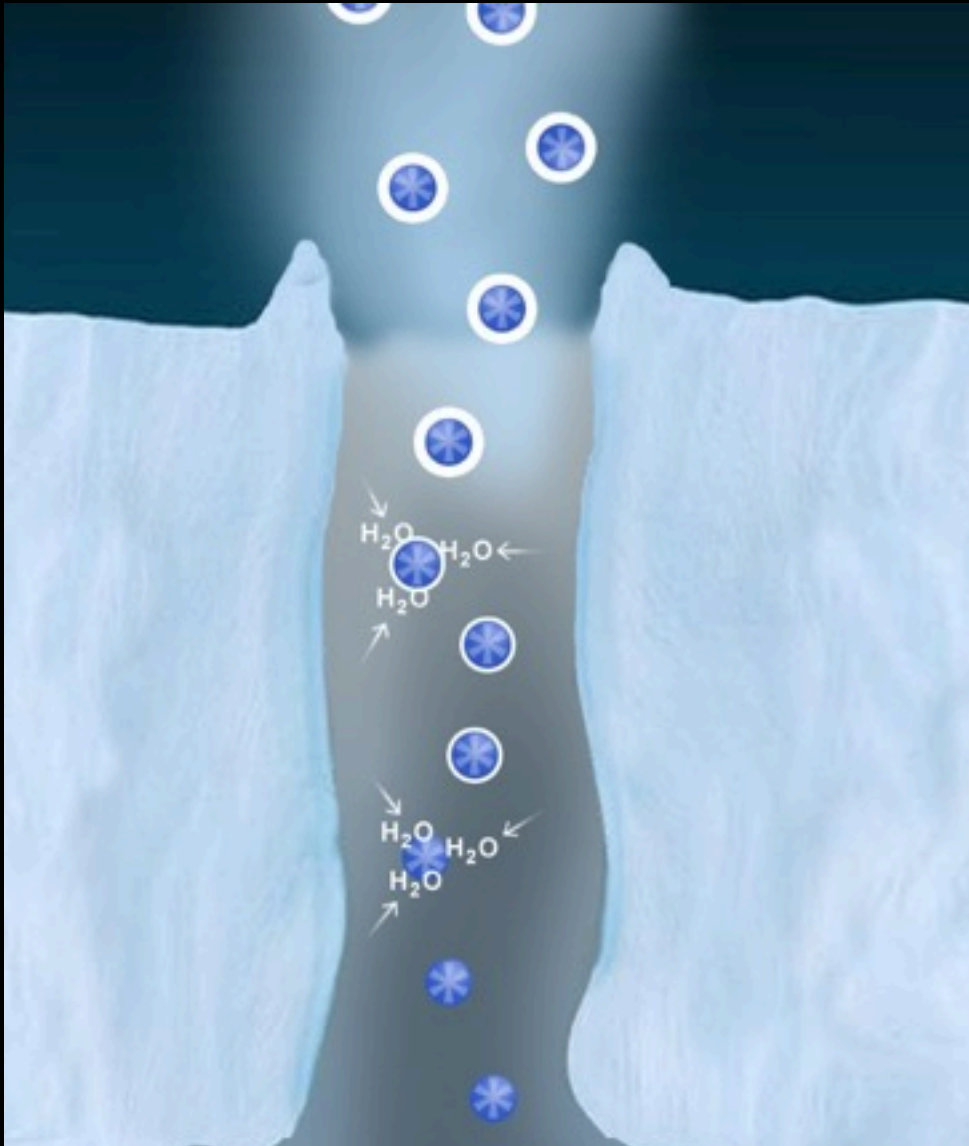
$\sim 1\mu\text{m}$



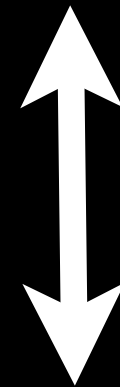
Hill-Radius  $\sim 950\text{ km}$

Fluchtgeschwindigkeit  $\sim 207\text{ m/s}$

# Widerspruch zu Daten

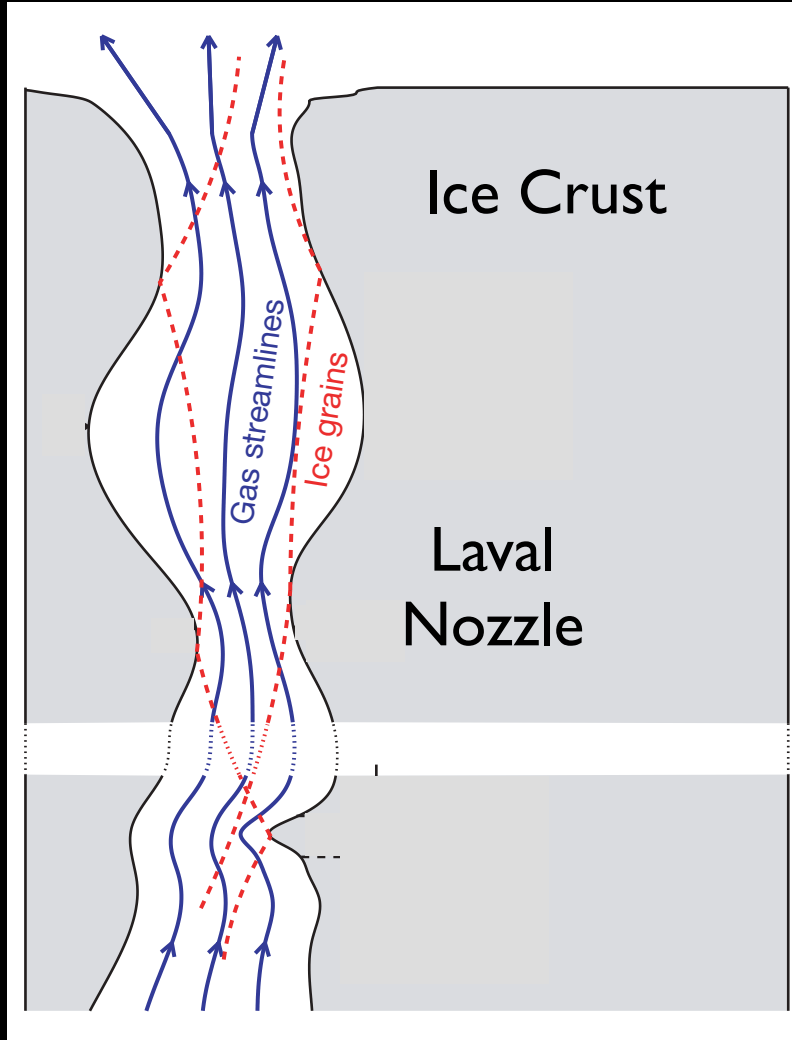


Staub an Gasfluß  
gekoppelt



Gas schneller als  
Fluchtgeschwindigkeit

# Wandstöße

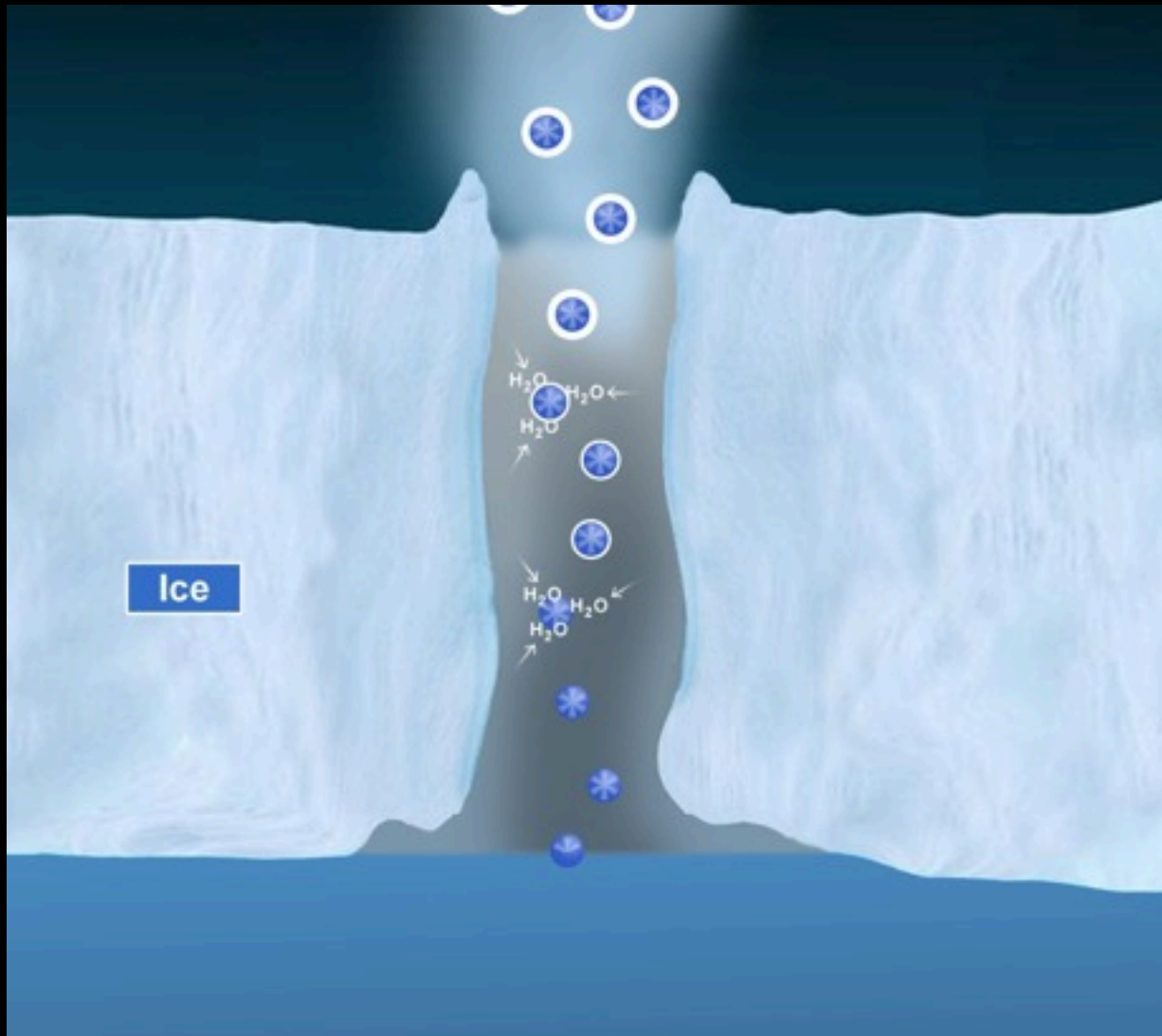


Geschwindigkeitsverteilung  
durch Wandstöße eingestellt

Wandform:  
Monte Carlo

Temperatur: 270°K

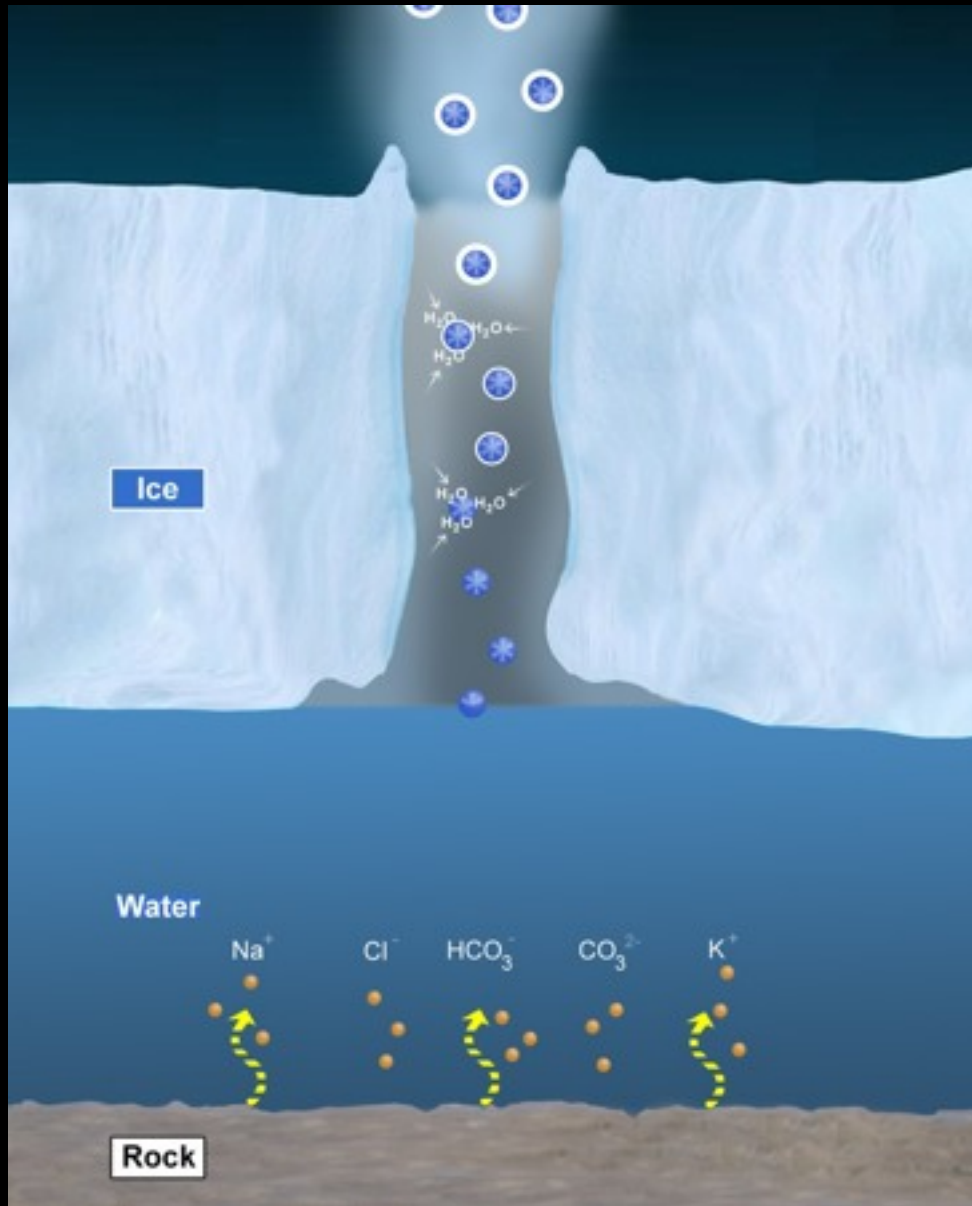
# Wasserreservoir unter Oberfläche



Grenzschicht am  
Trippelpunkt  
 $\sim 270^{\circ}\text{K}$

Direkter Beleg?

# Wasser + Gesteinskern



Wasser löst Salze

Zolotov, Geophys. Res. Lett., 34, 2007



Eisteilchen sollten salzig sein!



# Staubteilchen sind salzig!

Cassini Dust Detector CDA



Geyser Water Ice Grain

