

Raumsonde Cassini-Huygens bei Saturn



Internationale Amateursternwarte
Schriesheim

25. März 2018
Herbert Haupt

Cassini-Huygens-Mission



Mission zweier Raumsonden zur Erforschung des Planeten Saturn und seiner eisigen Monde.

- Cassini: Orbiter, im Auftrag der NASA vom Jet Propulsion Laboratory gebaut, um die Objekte aus einer Umlaufbahn um den Saturn zu untersuchen.
- Huygens: Lander, von Aérospatiale im Auftrag der ESA konstruiert.
- Außerdem beteiligt: die italienische Raumfahrtagentur ASI

Kurzübersicht der wissenschaftlichen Ziele

Saturn

- Zusammensetzung der Ionosphäre, Wolkeneigenschaften und Zirkulation der Atmosphäre; Wind- und Temperaturprofile
- Innere Struktur und Planetenrotation
- Magnetosphäre: Plasmazusammensetzung und Dynamik
- Wechselwirkungen mit dem Sonnenwind, den Monden und Ringen

Ringe

- Struktur, Zusammensetzung, dynamische Prozesse
- Wechselwirkung von Monden, Ringen und umgebendem Staub

Titan

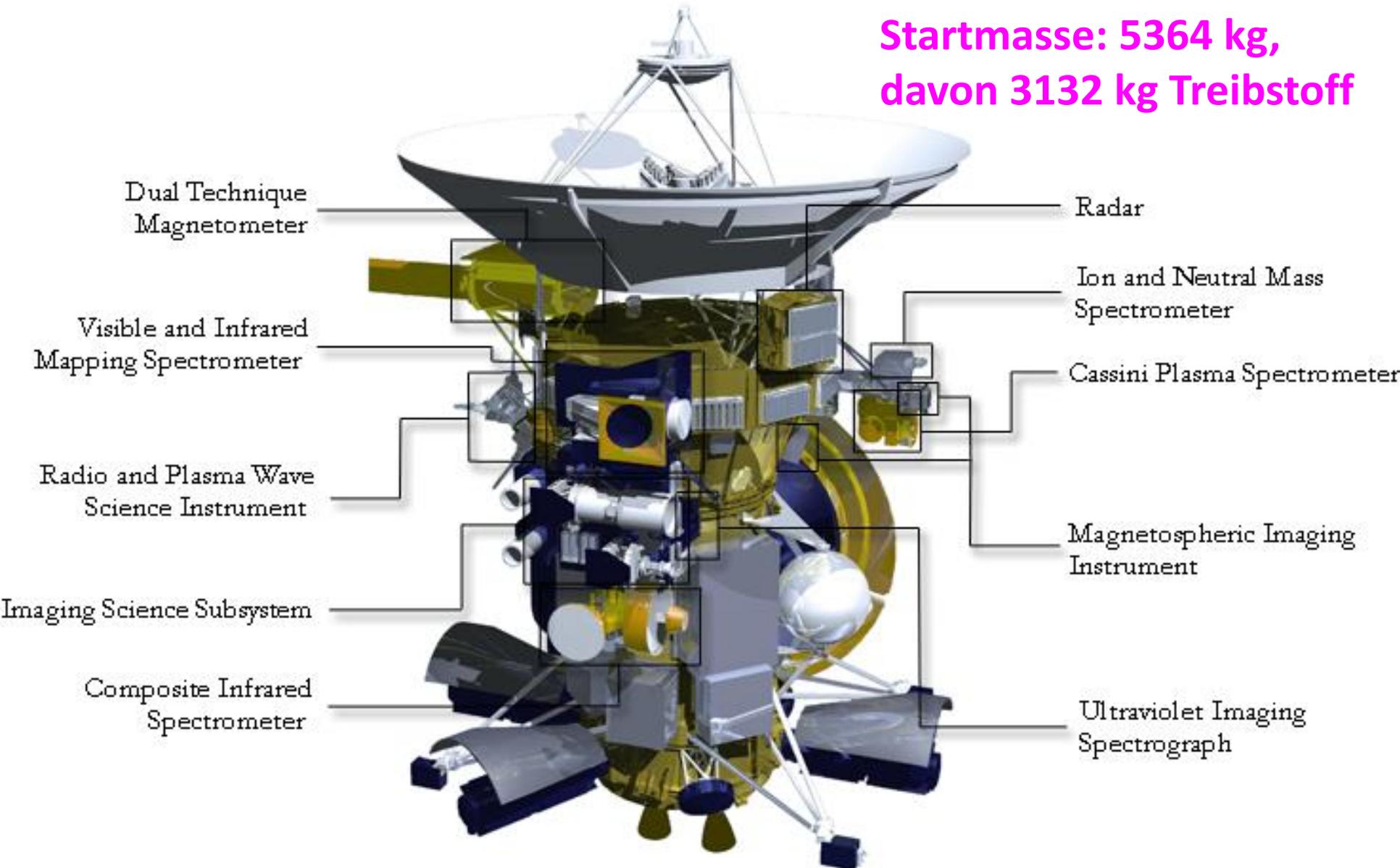
- Dynamik und Zusammensetzung der Atmosphäre, insbesondere der Verteilung der Spurengase und Aerosole
- Zustand der Oberfläche (fest/flüssig) und deren Zusammensetzung

"Eisige" Monde

- Eigenschaften und geologische Geschichte
- Oberflächenzusammensetzung und innere Struktur (z.B. Wasservorkommen, Vulkanismus)

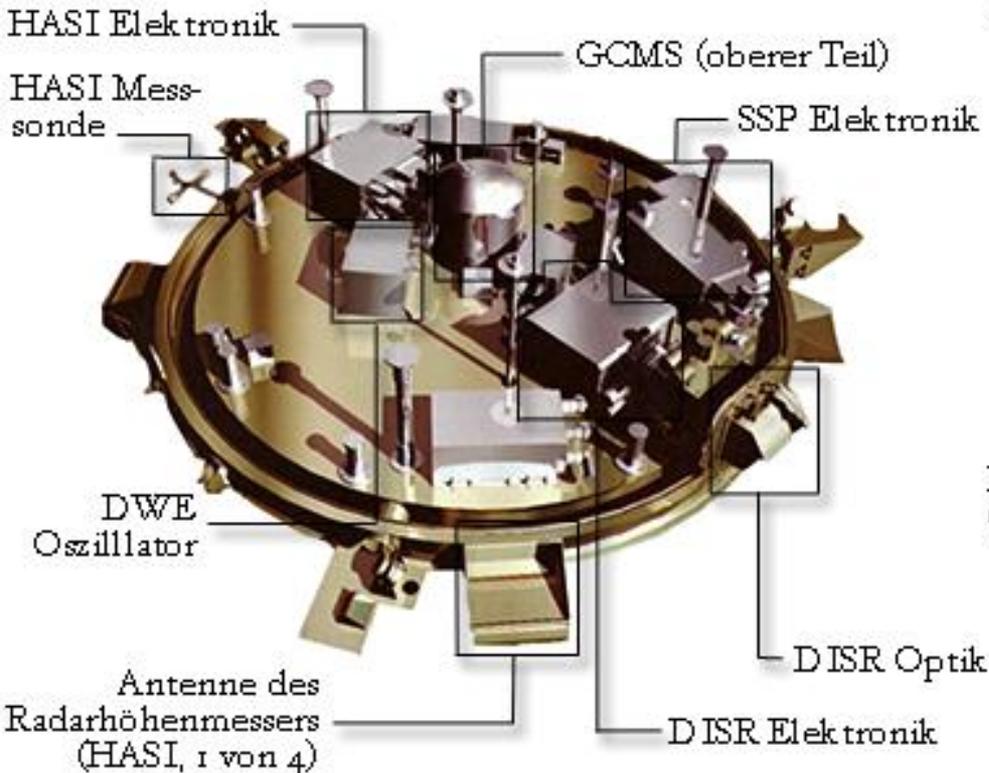
Cassini: wissenschaftliche Instrumente

**Startmasse: 5364 kg,
davon 3132 kg Treibstoff**

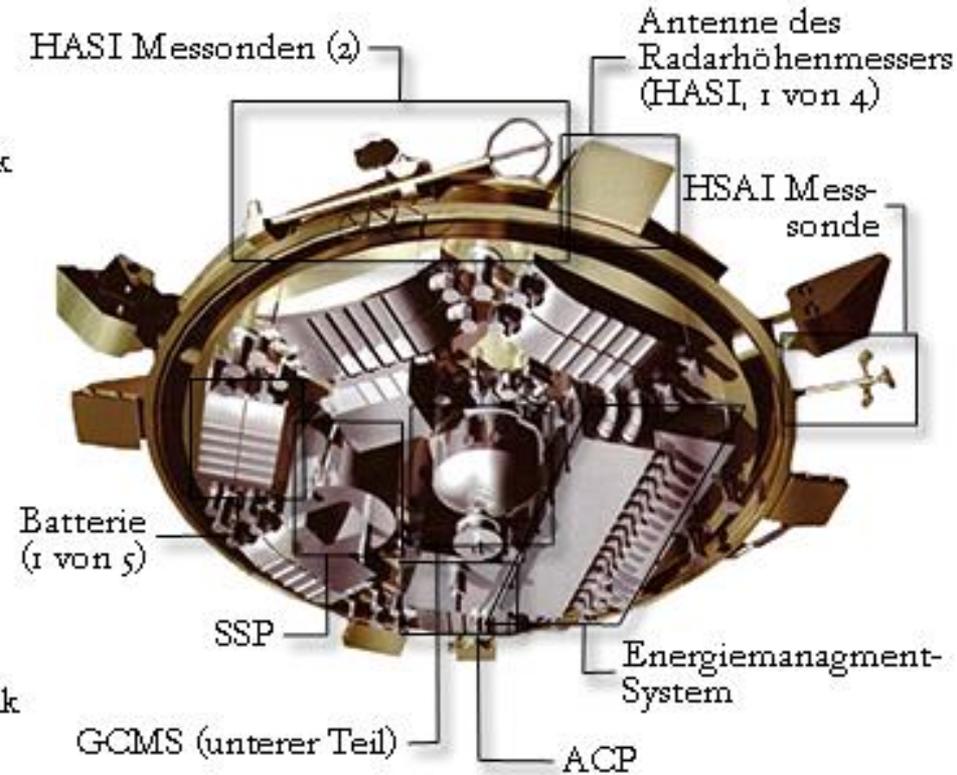


Wissenschaftliche Instrumente von Huygens

Oberseite

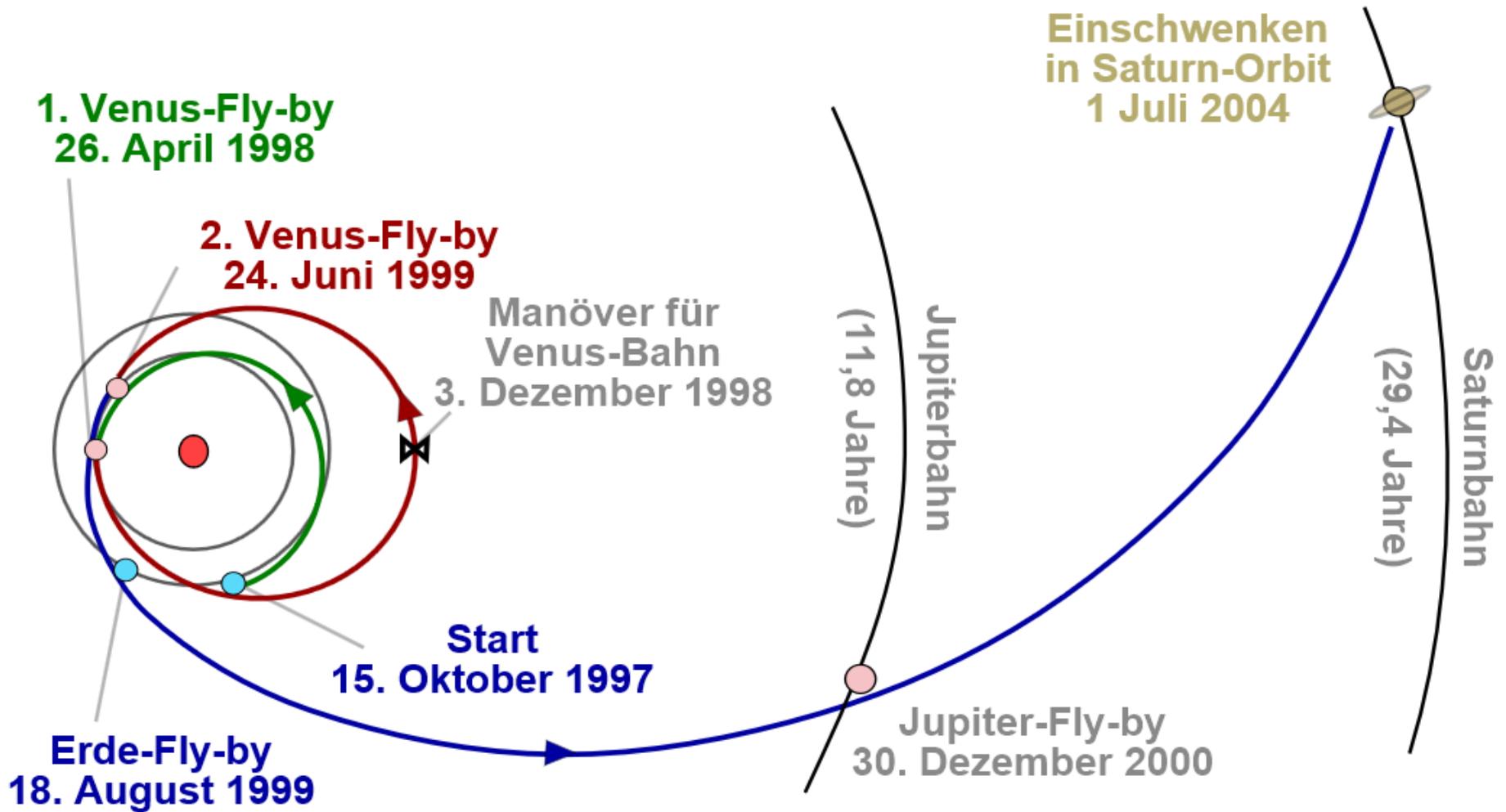


Unterseite



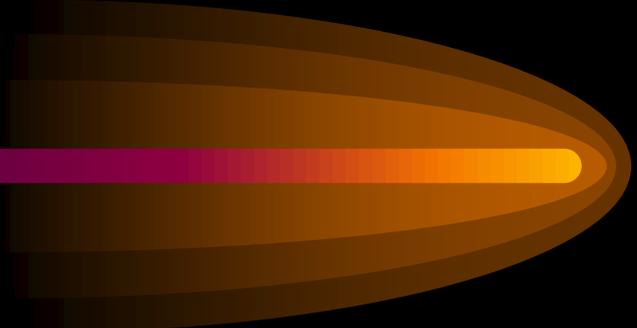
Huygens: von der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA entwickelte und gebaute Tochtersonde von Cassini für die Landung auf Titan

Cassinis Flug zum Saturn

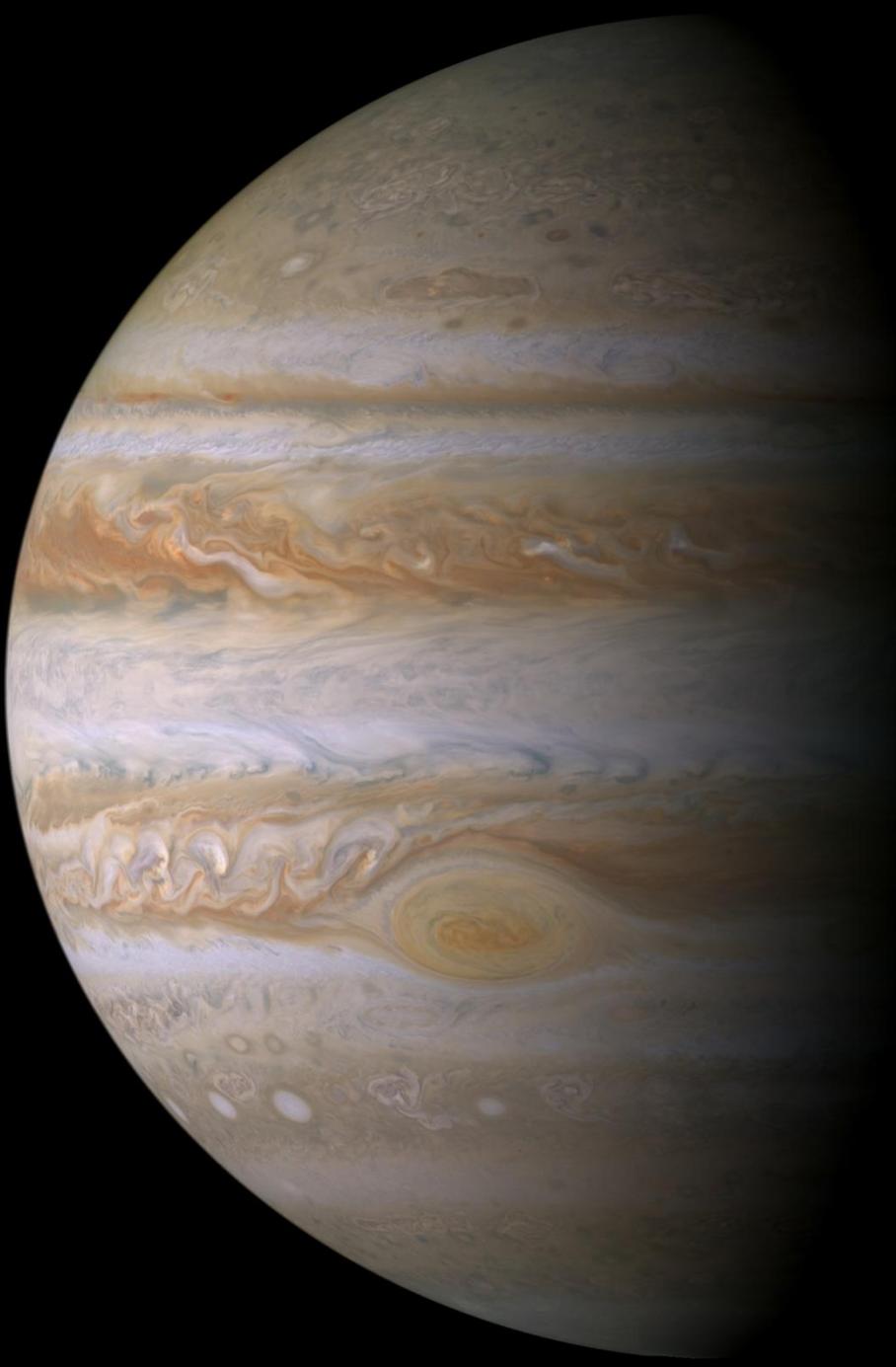


Für den Flug Schwung geholt mit vier Swing-by-Manövern an:
Venus 2x, Erde und Jupiter

Daten der Saturn-Mission



15.10.1997	Start
26.04.1998	Venus-Flyby 1
24.06.1999	Venus-Flyby 2
18.08.1999	Erde-Mond-Flyby
30.12.2000	Jupiter-Flyby
12.06.2004	Vorbeiflug an Jupitermond Phoebe
30.06.2004	Einschwenken in den Saturnorbit
26.10.2004	Erster Vorbeiflug an Titan
25.12.2004	Trennung Huygens von Cassini
14.01.2005	Huygens landet auf Titan
17.02.2005	Erster Vorbeiflug an Enceladus
August 2009	Entdeckung der Dicke der Saturnringe
April 2010	Aufnahme von Blitzen auf Saturn
22.06.2011	Hinweise auf Salzsee in Enceladus
29.11.2016	Beginn des „Grand Finale“
15.09.2017	Verglühen Cassinis in der Atmosphäre, Missionsende



*Cassini:
Vorbeiflug an Jupiter*

29.12.2000

Bis dahin detailliertestes
Echtfarben-Mosaik
aus Aufnahmen der
Schmalwinkel-Kamera
bei der größten Annäherung
an Jupiter aus ~ 10 Mio km

Phoebe: eingefangenes Planetesimal

= gescheiterter Protoplanet aus dem Kuiper-Gürtel

12.06.2004, aus 2000 km



Viele Einschlagkrater bis 50 km:

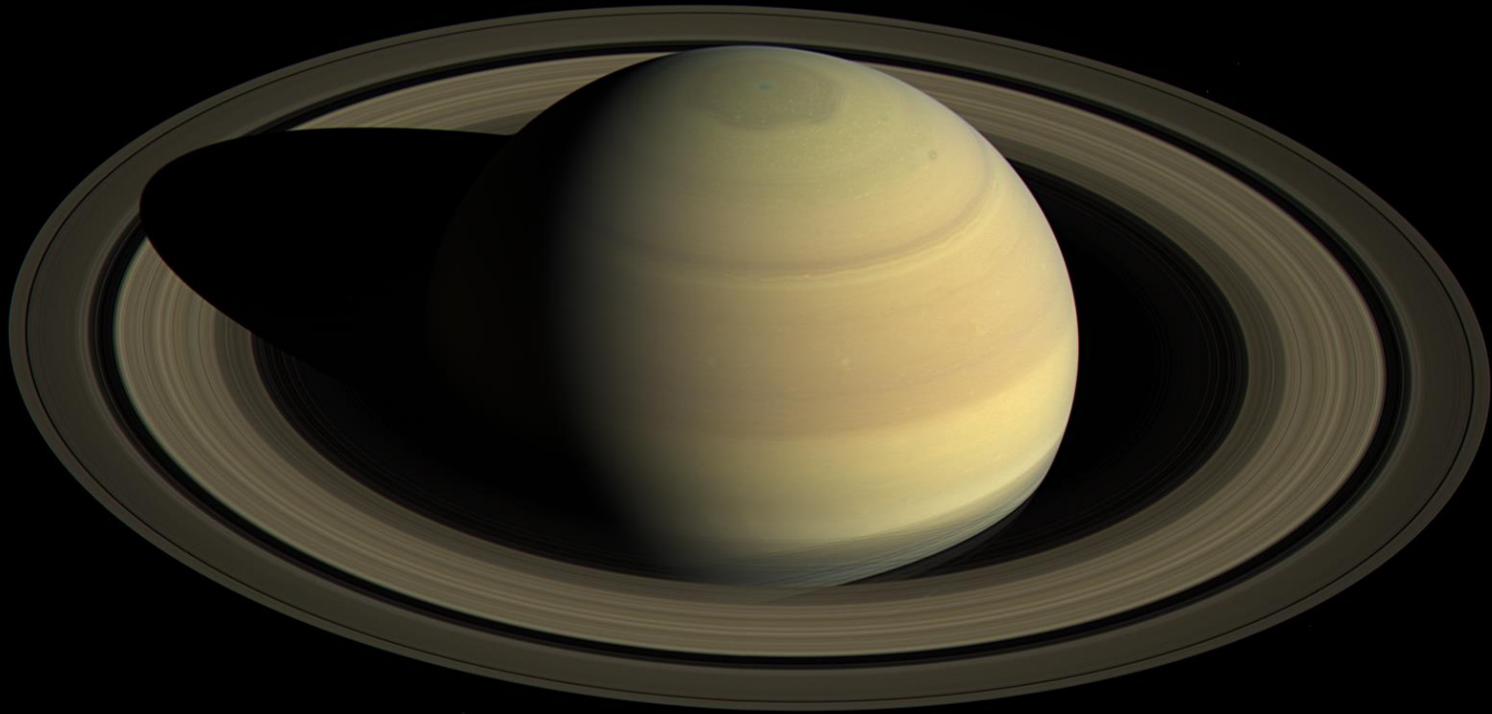
→ Phöbe ist ein Überbleibsel
aus der Entstehungszeit des
Sonnensystems (erste 3 Mio J.)

dann nach innen gedriftet und
von Saturn eingefangen.

Ihr Inneres wurde damals durch
Al-26 auf $>100^{\circ}\text{C}$ erwärmt und
verdichtet ($\rho \approx 1,6 \text{ g/cm}^3$).

213 km \emptyset , vorwiegend aus Eis,
bedeckt mit mehrere 100 m dicker
Schicht aus dunklerem Material.

Saturn April 2016 aus 3 Mio km

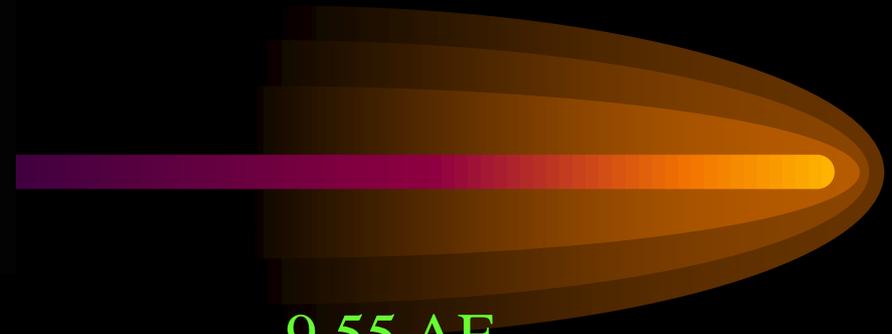


*Die amerikanisch-europäische Raumsonde Cassini
trifft am 30.06.2004 beim Saturn ein.*



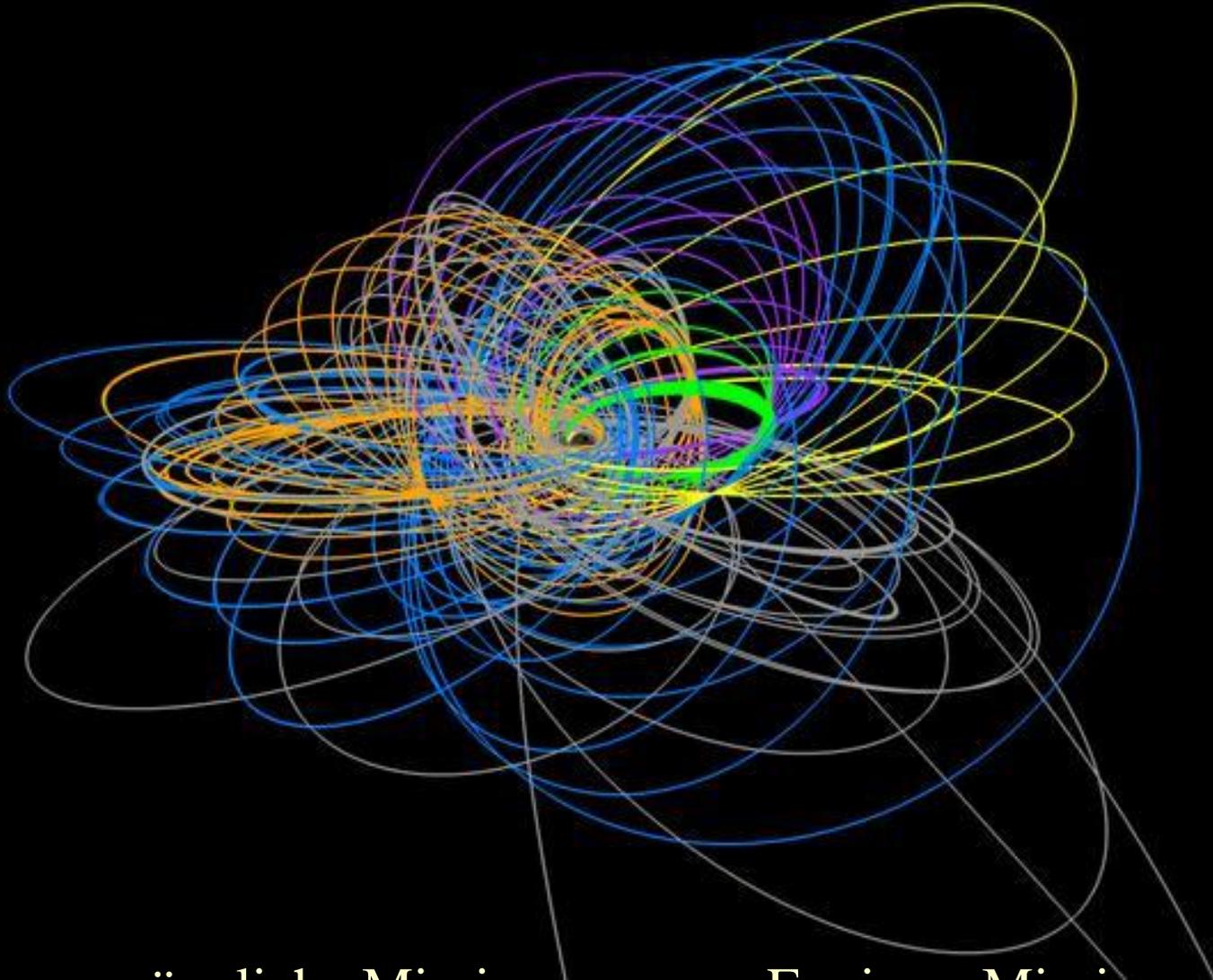
Saturn, der Ringplanet

Saturn – der Ringplanet



- Mittlerer Abstand zur Sonne: 9,55 AE
- Bahnexzentrizität: 0,06
- Umlaufdauer: 29,5 Jahre
- Neigung der Bahnebene gegen Ekliptik: 2,5 Grad
- Rotationsperiode: 10h 39min = 0,44 Tage
- Durchmesser am Äquator: 120 500 km = 9,4 $\varnothing_{\text{erde}}$
an den Polen: 108 700 km = 90% $\varnothing_{\text{äqu}}$
- Achsenneigung: 26,7 Grad
- Masse: $5,7 \times 10^{26}$ kg = 95,1 M_{erde} = 0,3 M_{jup}
- Mittlere Dichte: 0,687 g/cm³
- Temperatur bei Druckniveau 1 Bar: - 139° C
- Atmosphäre: 93 % H, nur 7 % He, Ammoniakkrystalle → gelb-braun

"Wollknäuel" der Orbits von Cassini



grau: ursprüngliche Mission; orange: Equinox-Mission;
blau, gelb und violett: Solstice-Mission,
grün: Missionen am Ring und das "Grand Finale" NASA/JPL-Caltech



Saturn und Ringe mit gegenseitigem Schattenwurf

10-2004

Alle Aufnahmen aus dem Orbit durch Cassini:
© NASA / JPL-Caltech / Space Science Institute

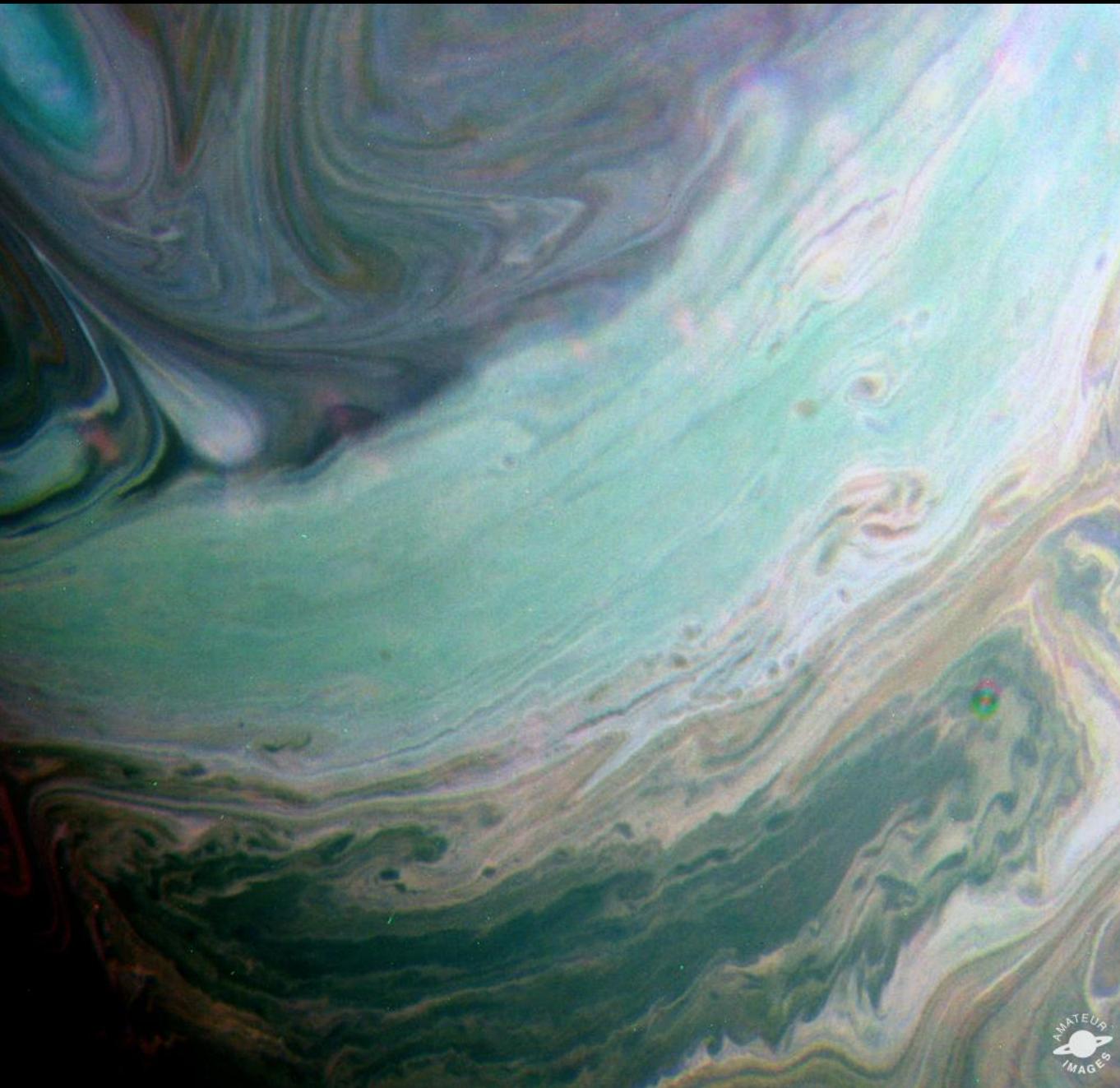
Megasturm auf Saturn 2011



Beginn eines gigantischen Sturms, der schließlich Saturn ganz umspannte.

Sehr dynamische und komplexe Struktur. Zudem fingen die Radioantennen Strahlung von heftigen Blitzen auf.

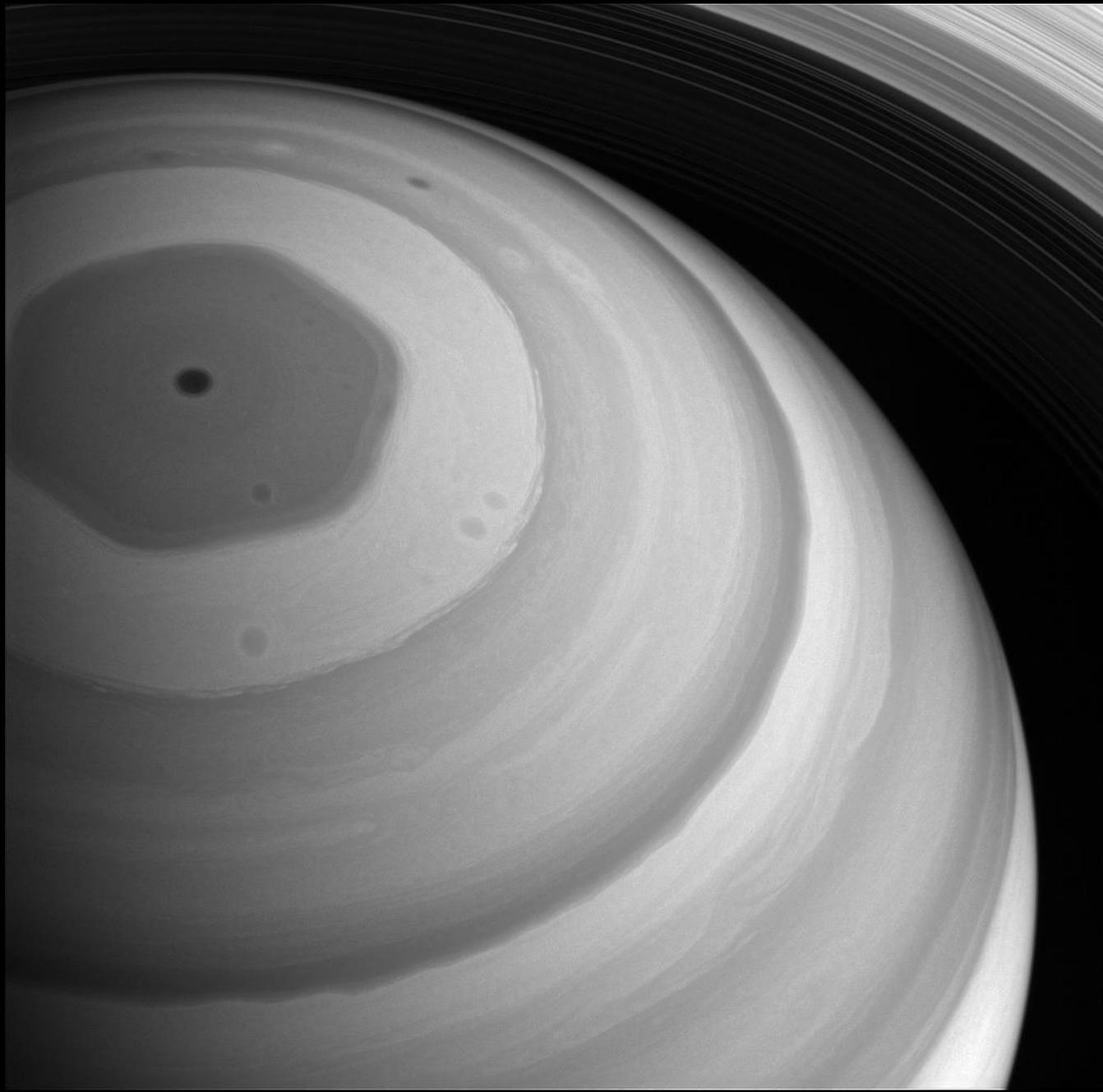
Solche hellen Flecken treten in Abständen von 20 bis 30 Jahren auf.



*Saturns
Stürmische
Atmosphäre
in Falschfarben
Kevin M. Gill
20.07.2016*

Aus Rohbildern im
nahen Infrarot:

- 750 nm → rot
- 727 nm → grün
- 619 nm → blau



Der Hexagon Jet-Strom



Saturn erscheint dunkler in Regionen mit weniger dichter Wolkendecke, wie z.B. im Innern des Hexagons.

WAC aus 1,2 Mio km,
Nah-IR um 728 nm

Saturn Nordpol

← Saturnringe

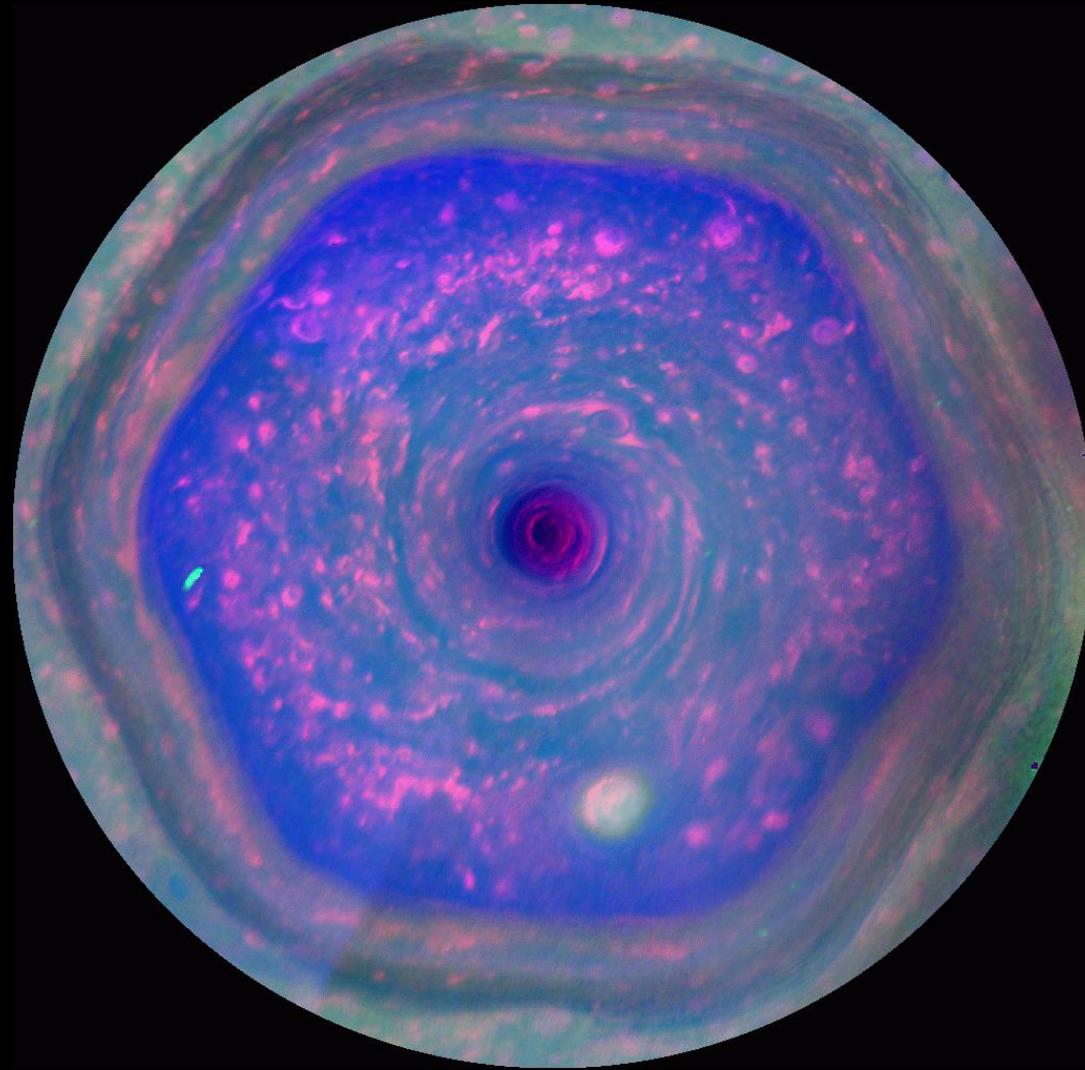
Auge am Pol:
 $\varnothing \approx 2.000 \text{ km}$

Hexagon:
 $\varnothing \approx 30.000 \text{ km}$

Ursache:
stehende Welle
in der Saturn-
Atmosphäre

Das nordpolare Hexagon auf Saturn

(Falschfarben)



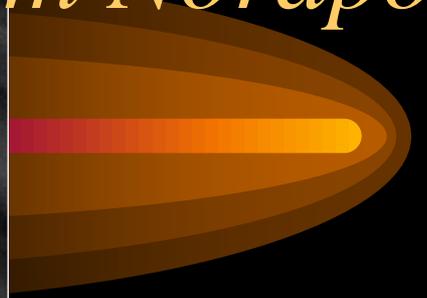
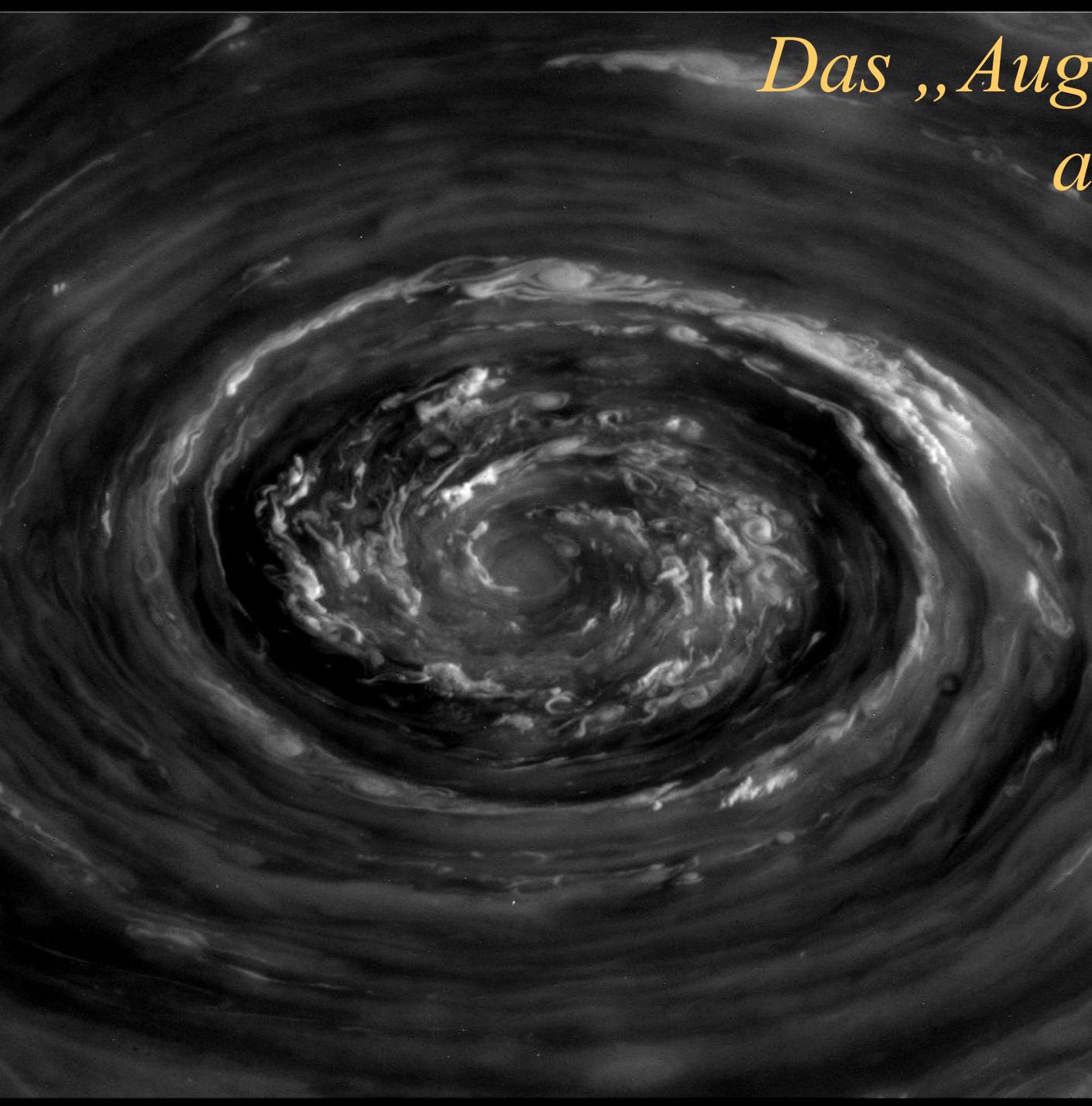
Deutlich zu sehen (in 10 h):

- die Bewegungen der Wolken innerhalb der Struktur,
- die Rotation des zentralen polaren Wirbels,
- und sich rasch bewegende kleinere Sturmwirbel.

Dabei ändert das Sechseck kaum seine Form und Größe.

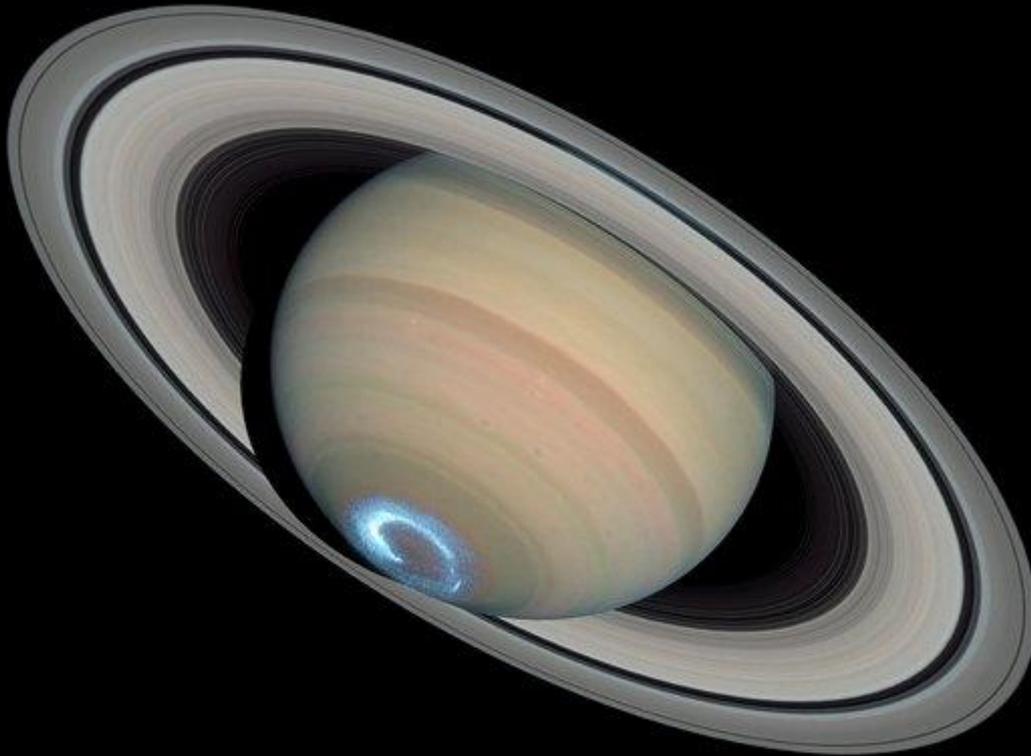
Genau auf der Rotationsachse:
der zentrale Sturmwirbel,
das „Auge“, mit ~ 2000 km Ø
und Windgeschwindigkeiten
bis 540 km/h.

*Das „Auge Saturns“
am Nordpol*



Da tobt
der Sturm!!

Polarlicht am Südpol



UV-Bild (blau) 28.01.2004, Hubble), dem sichtbaren Bild überlagert.

In Echtfarben ist das Polarlicht rot (Wasserstoff).

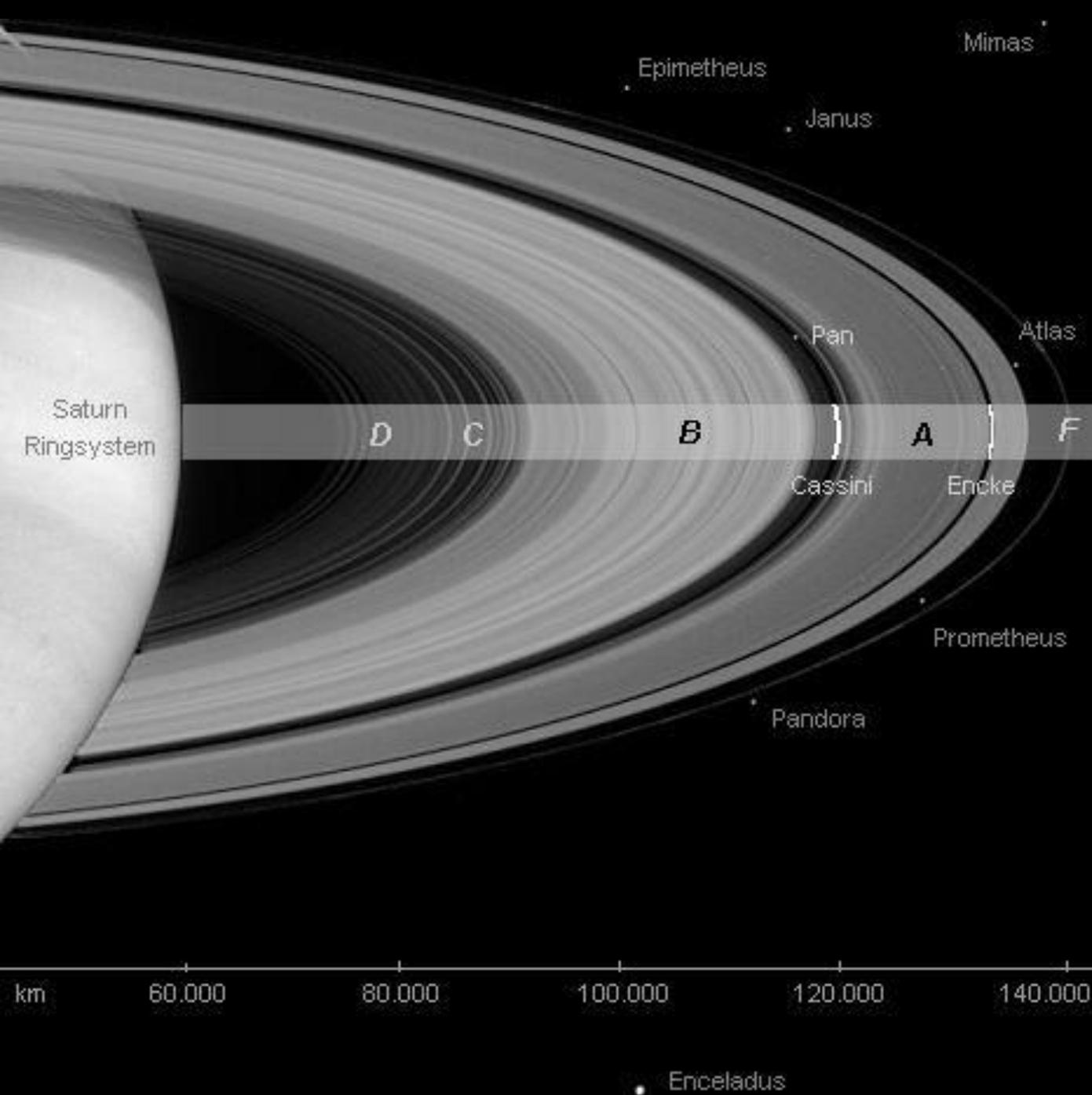
Cassini beobachtete vor Ort, wie eine interplanetare Schockwelle auf das Magnetfeld des Planeten traf: Emissionen im Radiobereich, Intensität der Aurora und Druck des anströmenden Sonnenwindes.

NASA, ESA, J. Clarke (Boston University) and Z. Levay (STScI)



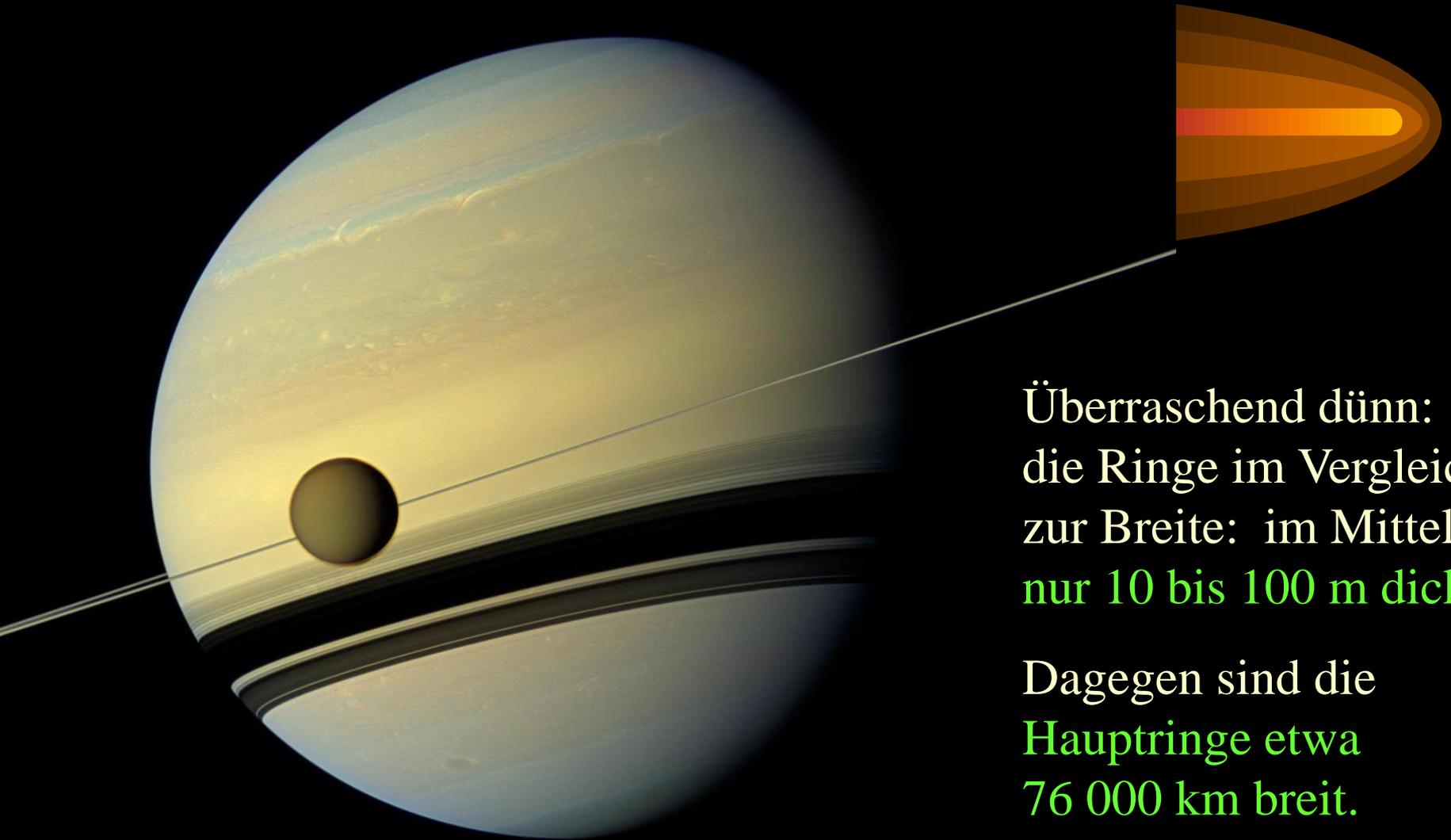
Die Ringe des Saturn

Saturns Ringsystem und innere Monde



Die bekannten,
dichten Ringe
beginnen nur
13.000 km über der
Wolkenobergrenze
und erstrecken sich
bis 140.000 km von
der Saturnmitte.

Saturn und Titan, Schattenwurf der Ringe



Überraschend dünn:
die Ringe im Vergleich
zur Breite: im Mittel
nur 10 bis 100 m dick!!

Dagegen sind die
Hauptringe etwa
76 000 km breit.

Die Ringe des Saturn

- sind **nicht starr!**
- **kreisen innen schneller als weiter außen (Kepler)**
- bestehen aus **Wassereis** und aus **Staub, Sandkörnern und Felsbrocken** bis größer 10m
- werden durch Resonanzen mit äußeren Monden oder durch Schäfermonde in **Tausende Ringe** unterteilt
- entstanden durch zerstörende Wirkung der **Gezeitenkräfte**
- Radius der Haupt-Ringe:
 - B-Ring innen: 92.000 km **Umlauf in 7,9 h**
 - A-Ring außen: 135.000 km **14,1 h**
 - äußerster E-Ring: 480.000 km **4 Tage**
- Durch die permanenten Zusammenstöße der Partikel ordnen sie sich in einer Schicht von **nur 100 m Dicke** an!!

Entstehung der Saturnringe

Drei Modelle:

1. Die Ringe sind mit Saturn entstanden.
2. Ein großer Mond ist durch Reibung nach innen gewandert und wurde nach Überschreiten der Roche-Grenze zerrissen.

Beide Modelle können nicht erklären, warum dann die Ringe fast nur aus Eis bestehen und kaum Gesteinsanteile haben.

3. Robin Canups Modell:

Ein großer Mond ähnlich Titan mit Gesteinskern und dickem Eismantel wanderte langsam über die Roche-Grenze. Dabei haben die Gezeitenkräfte zunächst vor allem den Eispanzer angegriffen, der nach und nach abgetragen wird und die Ringe bildet.

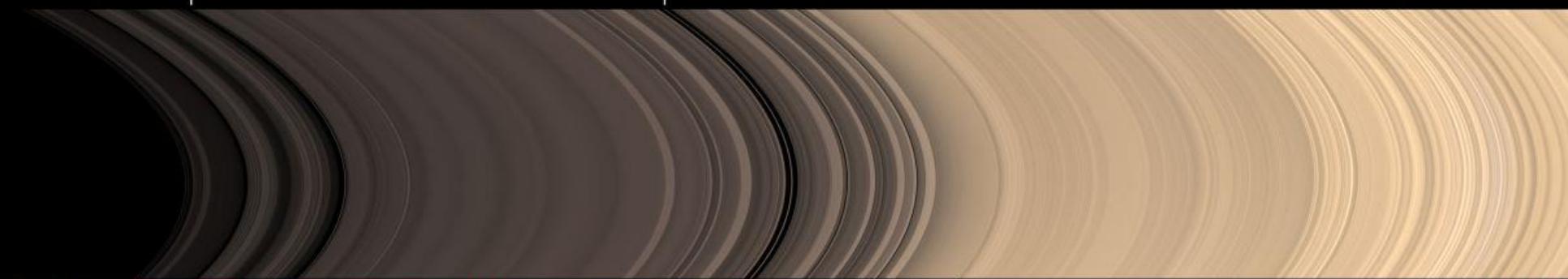
Schließlich stürzt der Restkern auf den Saturn.

Dichte- und Helligkeits-Unterschiede



Colombo Gap

Maxwell Gap



D Ring C Ring B Ring

74,500 km

92,000 km

Huygens Gap

Encke Gap

Keeler Gap



B Ring A Ring F Ring

117,580 km

Cassini Division

122,200 km

A Ring

136,780 km

140,220 km

Radio-Analyse der Hauptringe

0,94/3,6/13 cm-Signale durch die
Ringe zur Erde gesandt!

10 km/pixel



→ Partikelgrößen:

breiter Größen-Bereich,

bis zu Blöcken von zig Metern , aber

Schwerpunkte: purpur: > 5 cm; blau: < 5 cm; grün: < 1 cm

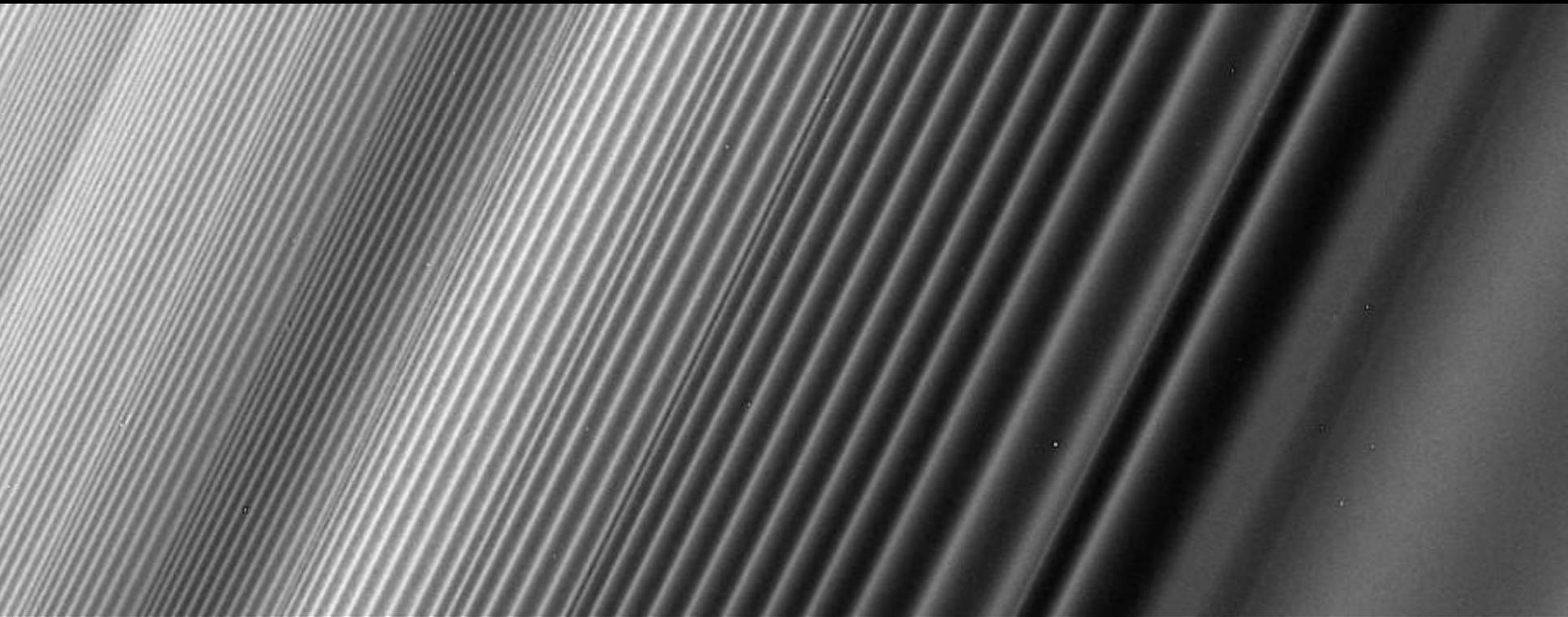


B-Ring: zentraler Teil (Echtfarben, höchste Auflösung)

Komposit aus Bildern der Schmalwinkel-Kamera vom 6. Juli 2017

NASA/JPL-Caltech/SSI

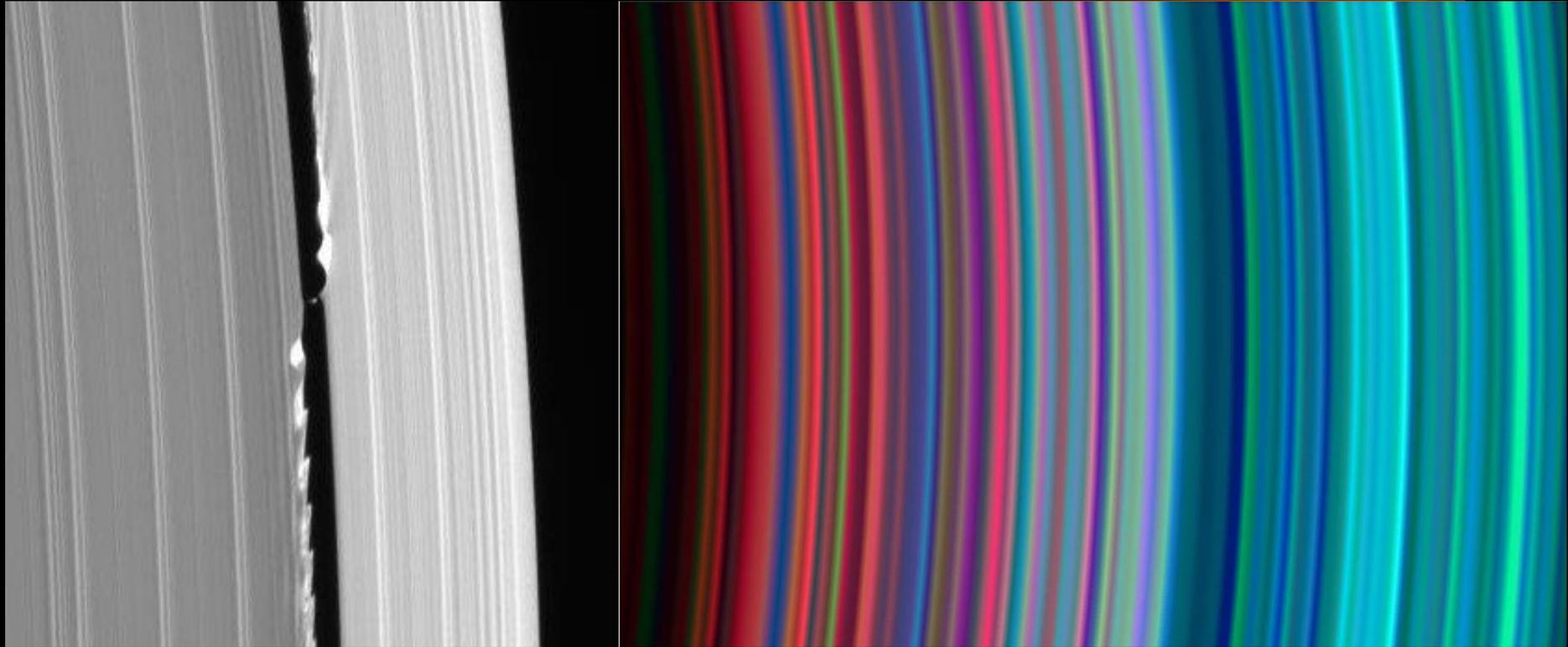
Dichtewellenstruktur im B-Ring



Blick durch die Ringe am 4.06.2017 aus 76.000 km auf diese außergewöhnliche Struktur im B-Ring Saturns.

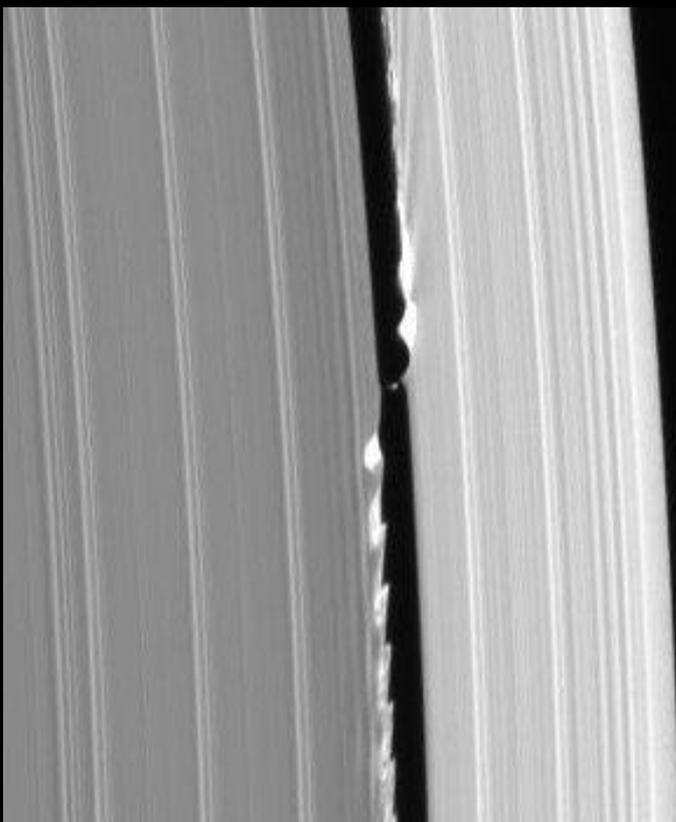
Die Dichtewellen entstehen durch ähnlichen Mechanismus wie in Spiralgalaxien. Die Spiralen im B-Ring sind jedoch vielfach öfter aufgewickelt: Jeder zweite Wellenberg gehört zur selben Spirale.

Gravitative Wechselwirkungen im Ringsystem



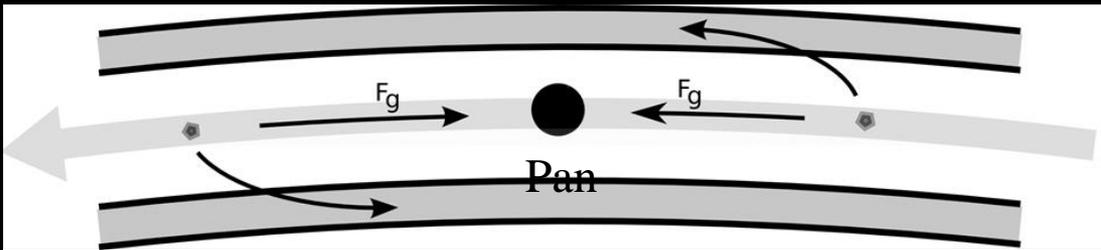
Gravitative Wechselwirkungen mit kleinen Monden in den Ringen und Resonanzen mit großen Monden außerhalb spalten die Ringmaterie in tausende Teilringe mit sehr verschiedener Material-Zusammensetzung auf

Schäferhund-Monde im Ringsystem



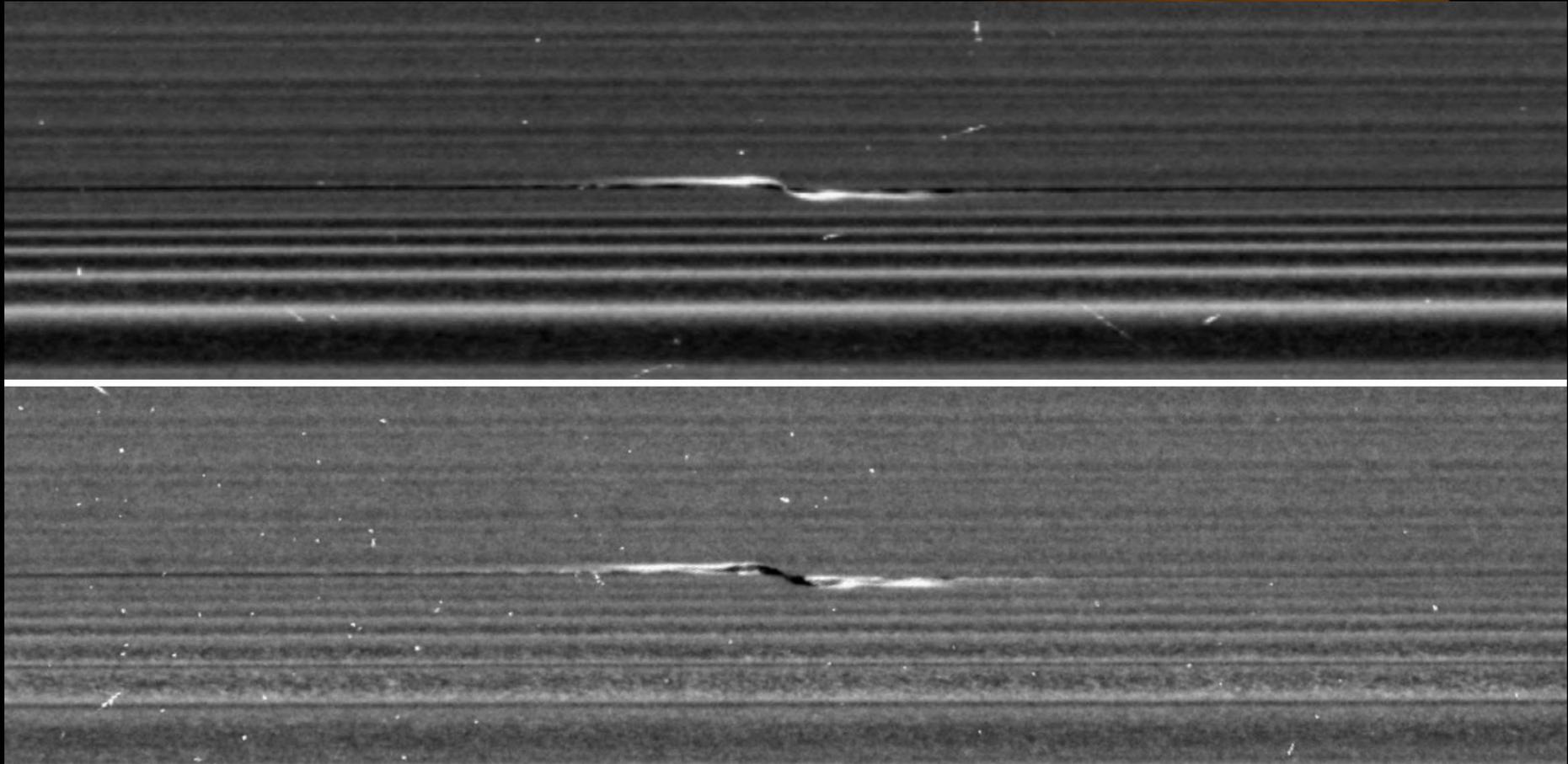
Pandora und Prometheus →
(mittlere $\varnothing = 84/91$ km)
halten F-Ring-Material
auf der Bahn, verdreht
und nur 100 km breit

← Pan (25 km) räumt
Encke-Teilung frei
und schlägt Wellen



← Freiräumen der Lücke

„Propeller“-Struktur auf der Licht- und Schattenseite der Ringe



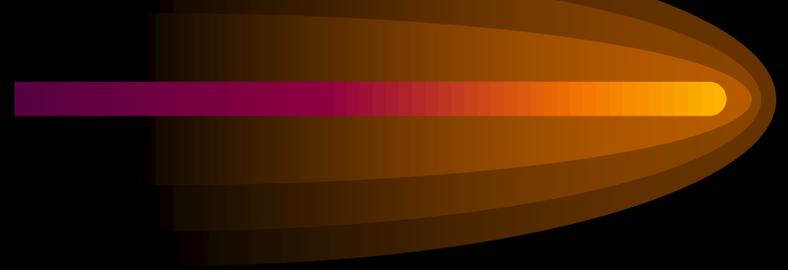
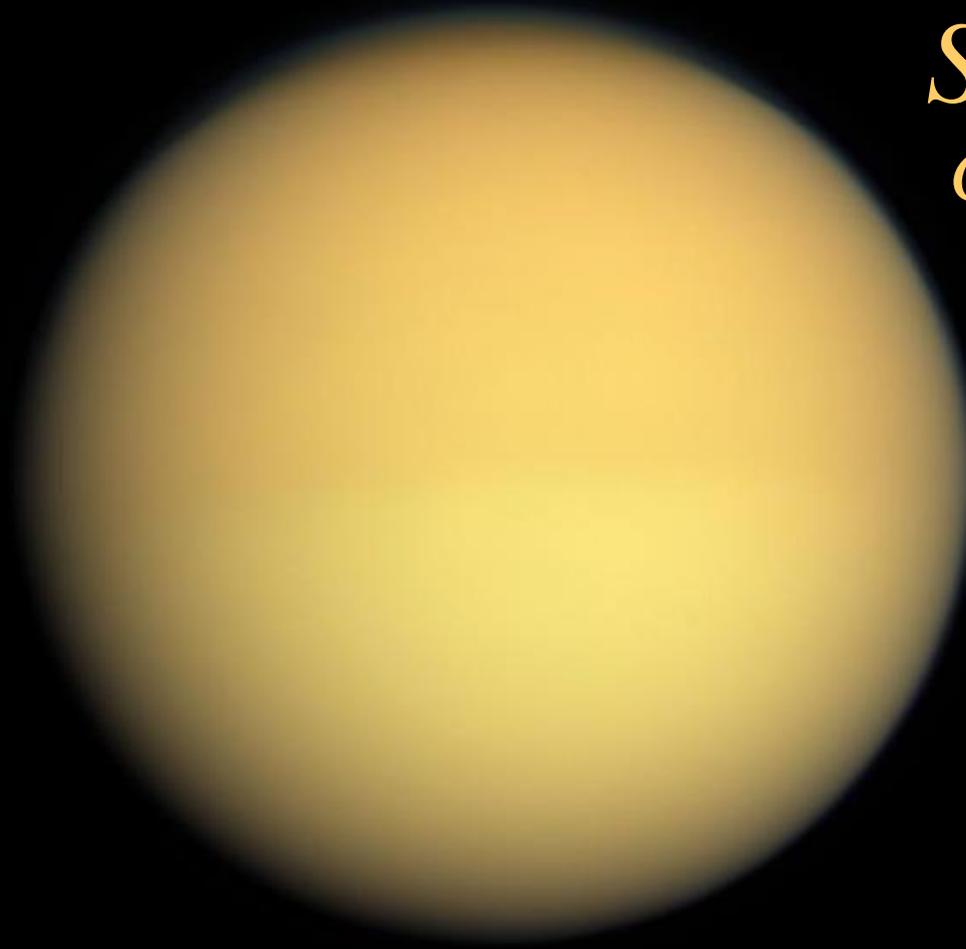
Möndchen (um 1 km \emptyset) bewirken kleine Lücken mit ~ 2 km Breite,
und kleine dynamische Wirbel



*Die Landung der Huygens-Sonde
auf Titan*

Saturn-Mond Titan

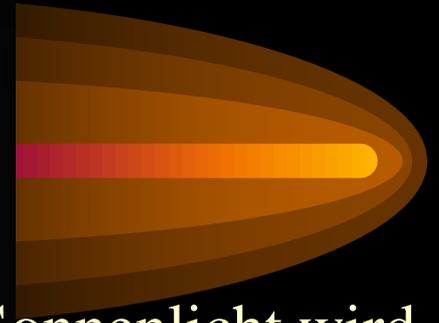
Cassini 2009 aus 174.000 km



Einzigiger Mond mit dichter Atmosphäre (1,5 bar),
strukturlos im Optischen.

Zweitgrößter Mond im Sonnensystem: $\text{Ø} = 5150 \text{ km}$

Titan im Gegenlicht



Das Sonnenlicht wird in der dichten Titan-Atmosphäre (1,5 bar) weit um den Planeten herum geleitet.

Titan-Atmosphäre

Einzigster Mond mit Atmosphäre:

OF-Temperatur: -180 °C

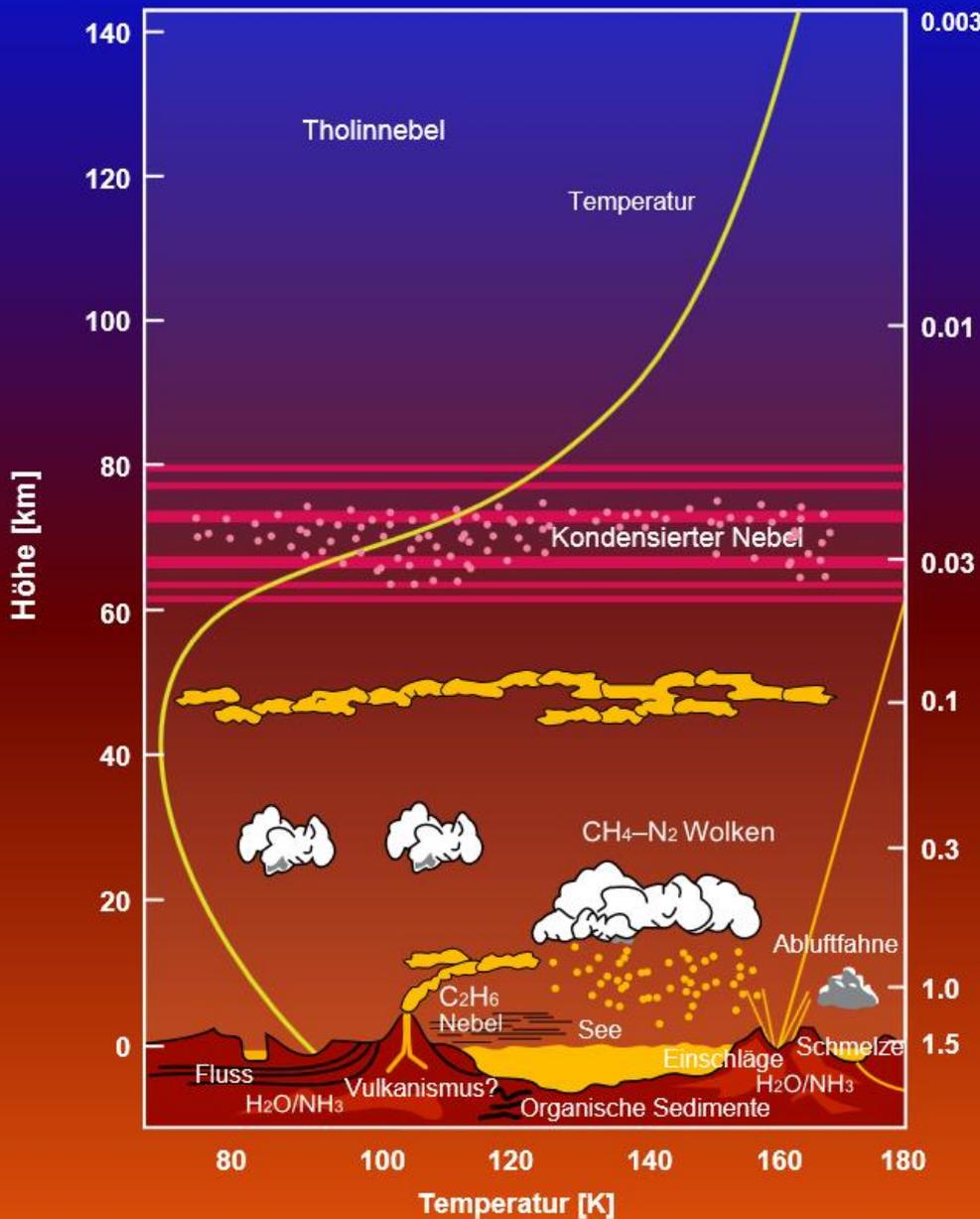
Druck an OF: 1,5 bar

Lufthülle: 98,4% N_2

1,6% Methan

Amateurmessungen in 11/2003 bei der Bedeckung eines Sterns durch Titan haben zur Änderung des Abstiegs-Programms der Huygens-Sonde geführt!!
Sonst Absturz!!

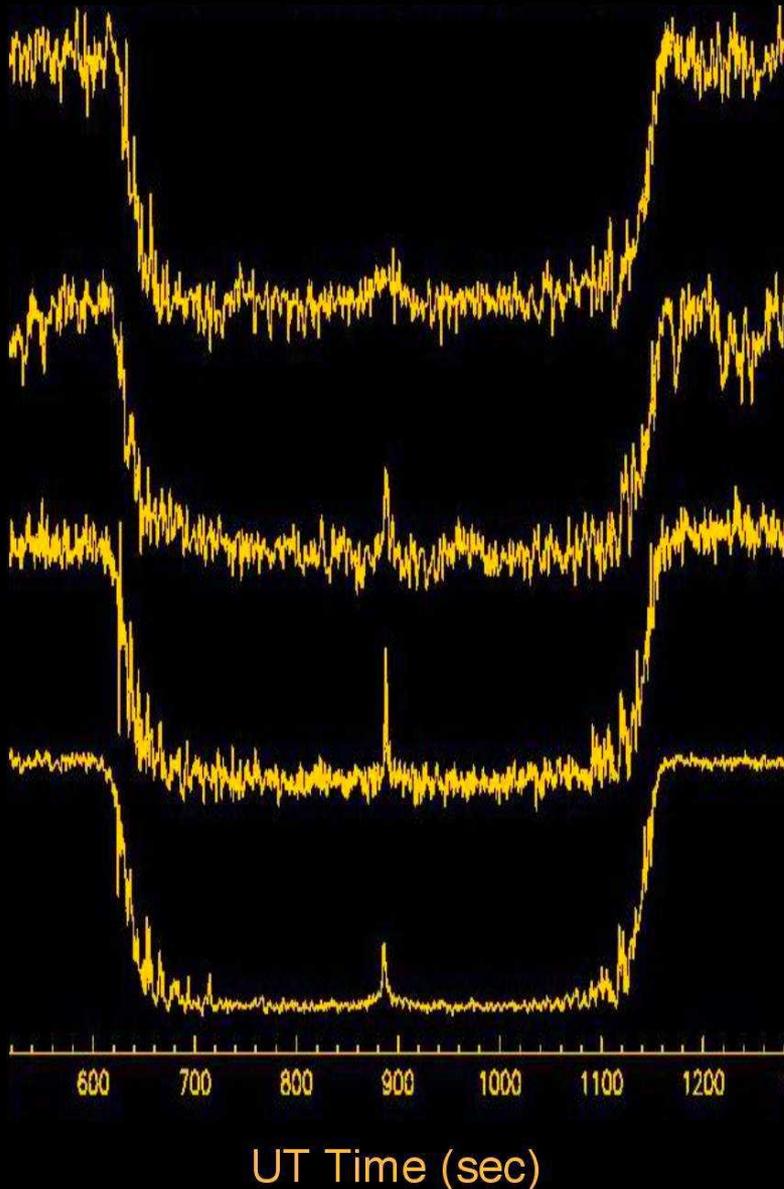
Auch 6 IAS-Mitglieder beteiligt!



“The two Titan stellar occultations of 14 Nov. 2003“, J. Geophys. Res. Vol. 111, E11S91

Titan bedeckt Stern TYC1343-1615-1

13./14.11.2003

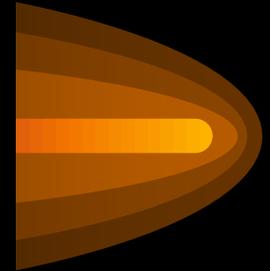


Sandfontein, M10, RG715

Gifberg, C14, RG715

Cederberg, M12, RG715

SAAO, 1-m, I



Messungen von Amateurastronomen
im Süden Afrikas unter Leitung von
Bruno Sicardy, Observatoire de Paris:
daraus Dichte der Atmosphären-
Schichten abgeleitet!!

Cassini: Titan

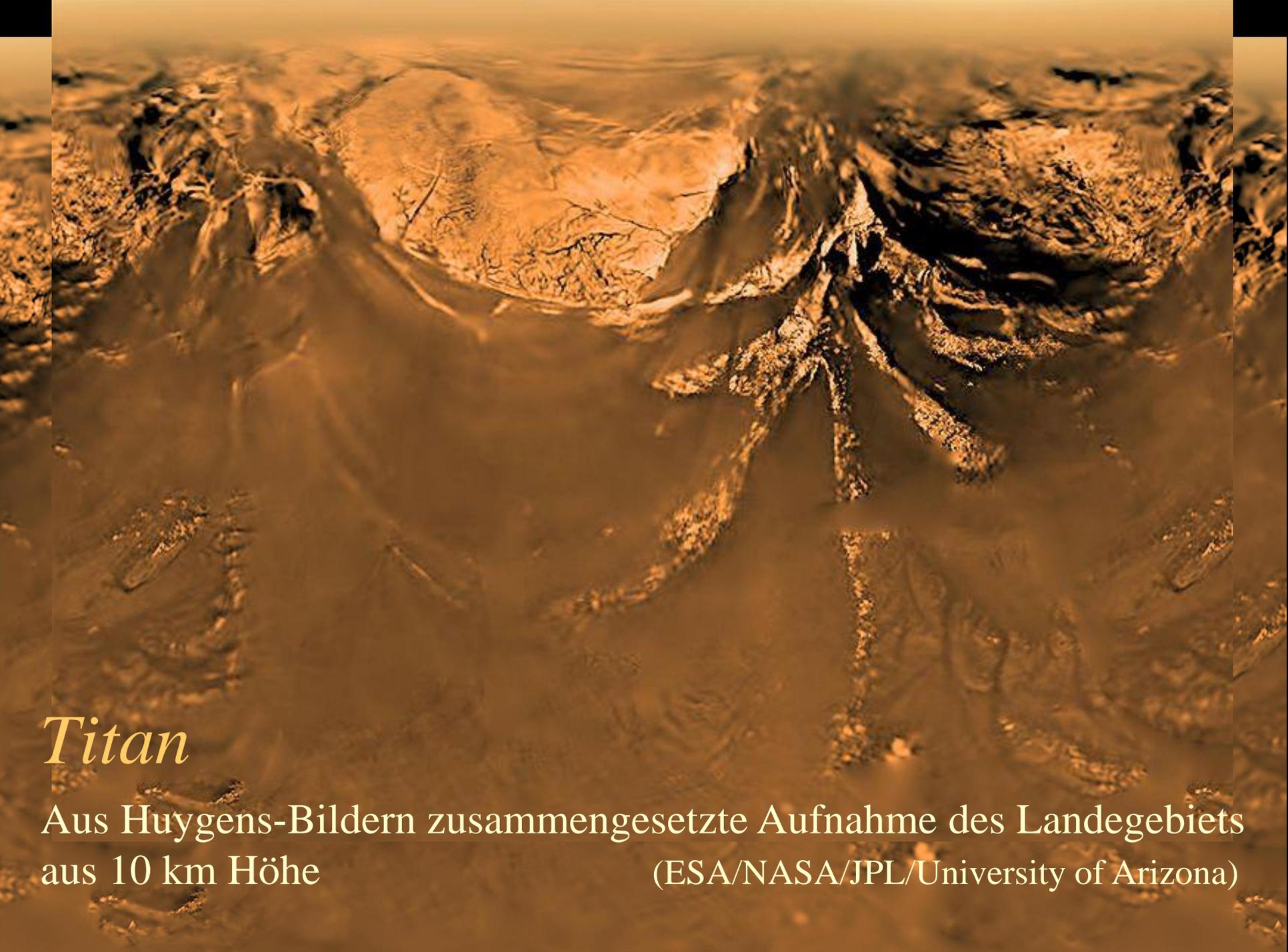
Ende Oktober 2004

Falschfarben

*Schichtung und Strukturen
der Methanatmosphäre*

Die blau erscheinende Außenhülle zeigt dünne Methanschleier in der Hochatmosphäre, die die blauen Anteile des Sonnenlichts streuen → vorherrschend orange-gelbe Farbe Titans.

Von der Oberfläche sind wegen des dichten Methansmogs nur wenige Konturen erkennbar.

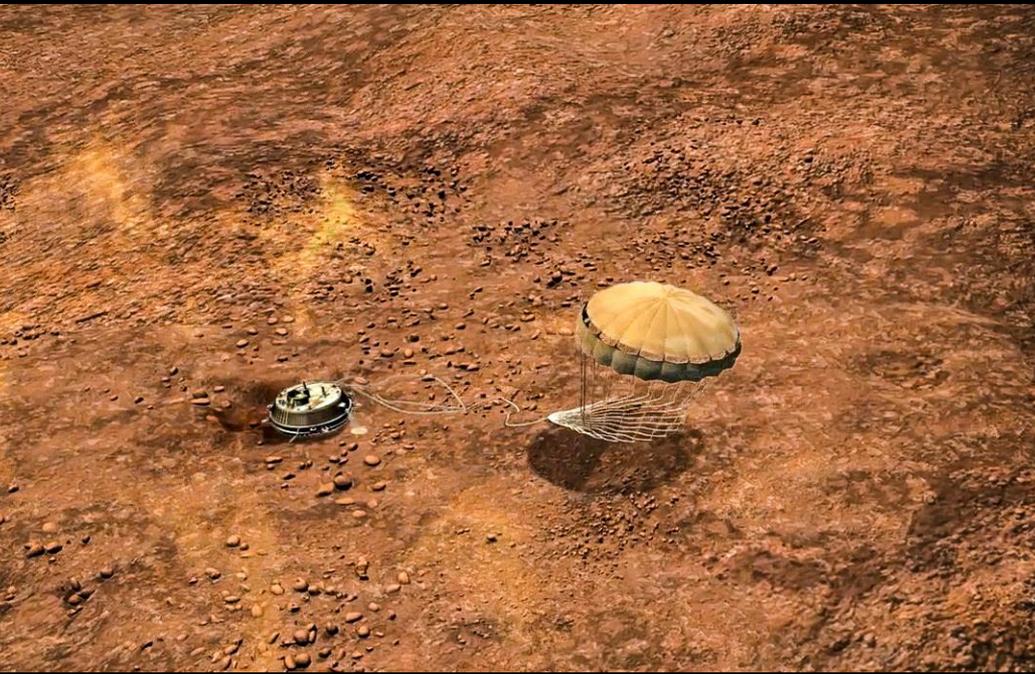


Titan

Aus Huygens-Bildern zusammengesetzte Aufnahme des Landegebiets
aus 10 km Höhe

(ESA/NASA/JPL/University of Arizona)

Huygens-Landung auf Titan



Zeichnung: ESA–C. Carreau/Schröder,
Karkoschka et al (2012)

Ein Meilenstein der Raumfahrtgeschichte!

Huygens' Landung begann in 1300 km Höhe; er bremste in drei Minuten von 5 auf 0,4 km/sec ab. Zwei Fallschirme bremsten ihn weiter.

In 160 km Höhe wurden die ersten Analyseinstrumente eingeschaltet.

Nach dem Aufsetzen sendete Huygens **72 Minuten von der Oberfläche**, bevor er angesichts der widrigen **-180 °C** den Dienst einstellte.

Insgesamt wurden 474 Megabit empfangen, darunter 350 Bilder.

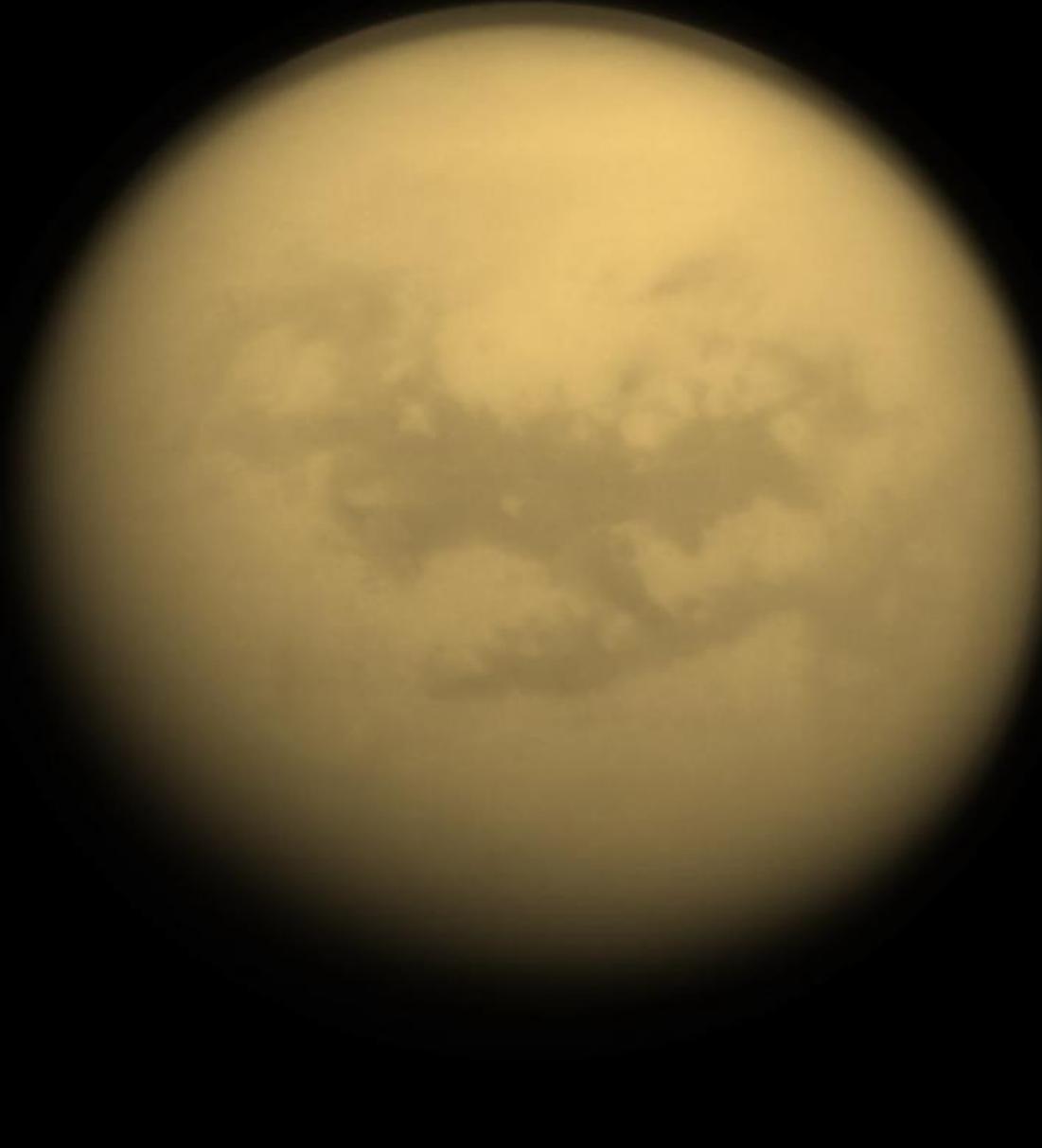
14. Januar 2005

Huygens auf Titan

Wegen der undurchsichtigen Dunstschichten war die **Landung ein Flug ins Unbekannte.**

Huygens hätte sogar in einem Meer aus flüssigem Methan schwimmen können. - Er war jedoch in einem ausgetrockneten Flussbett gelandet; mit dem Unterschied, dass die "Steine" aus **Wassereis bestehen.**

← **Erstes Bild nach der Landung**



Titan im IR

Im Infraroten ist die Methan-
Atmosphäre durchsichtig!

Titan hat einen auf Methan
basierenden Flüssigkeits-
kreislaufs, der dem
Wasserkreislauf der Erde
ähnelt.

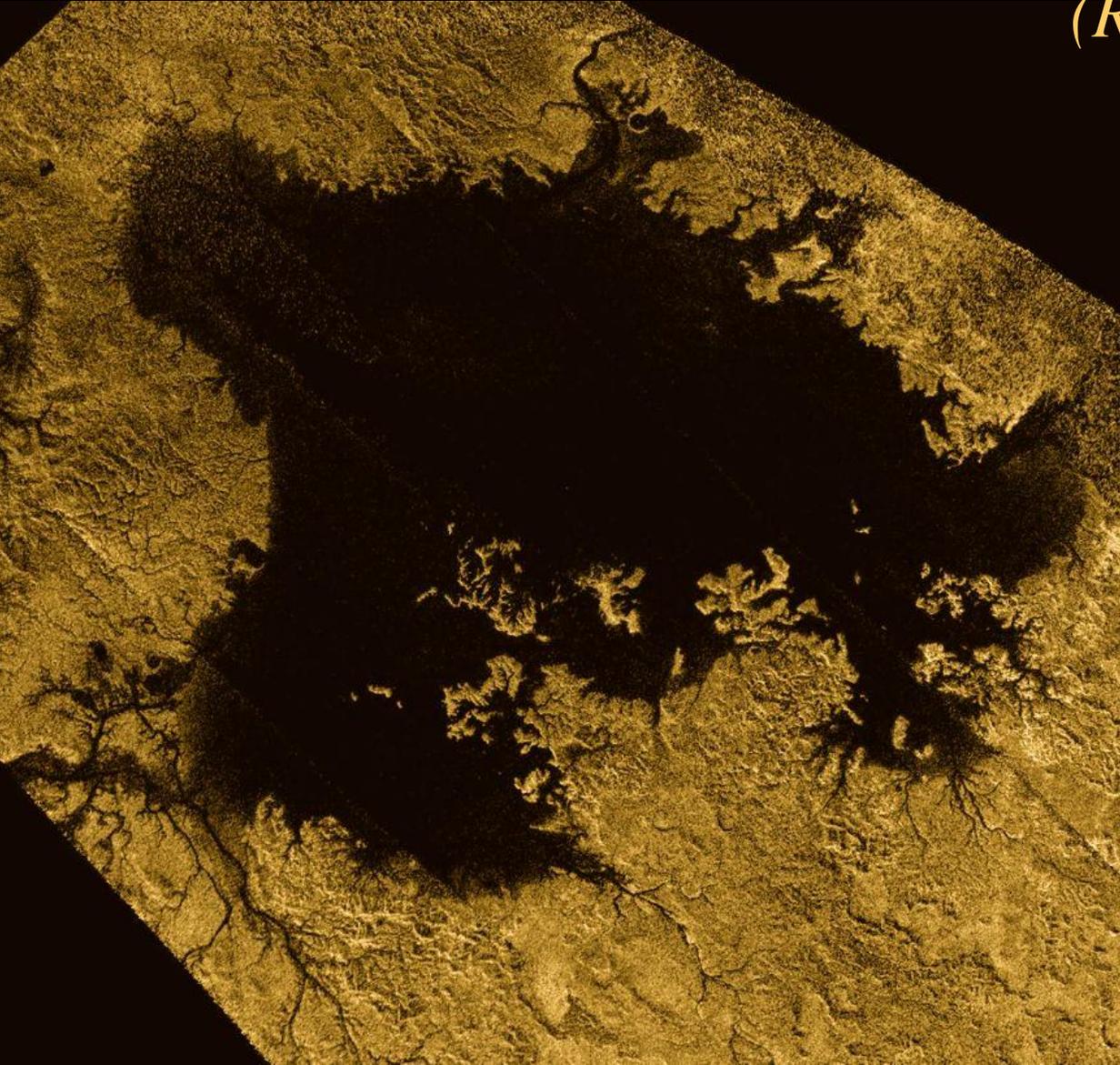
Cassini lieferte zudem
eindeutige Indizien, dass
es unter der eisigen Kruste
einen Ozean aus flüssigem
Wasser gibt.

Darin wäre niederes Leben
denkbar!

Cassini: ein Methan-See auf Titan

Falschfarbenaufnahme von Ligeia Mare

(Radarbeobachtungen)



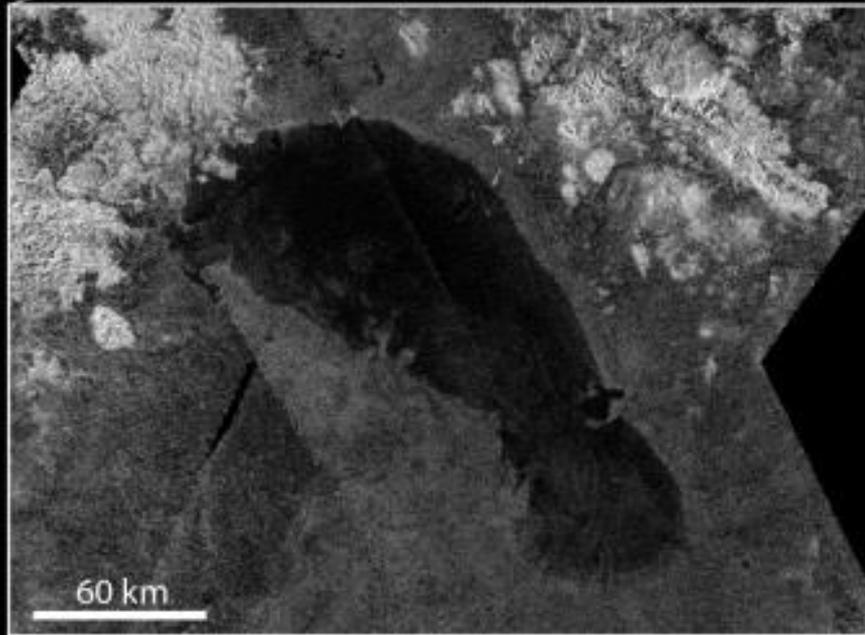
Der See aus Methan
könnte auf seinem
Boden eine schlamm-
artige Schicht aus
Kohlenwasserstoffen
haben.

Tiefe des Sees: ~ 160 m

NASA / JPL-Caltech / ASI /
Cornell

Titan-See verwandt mit Etosha-Pfanne

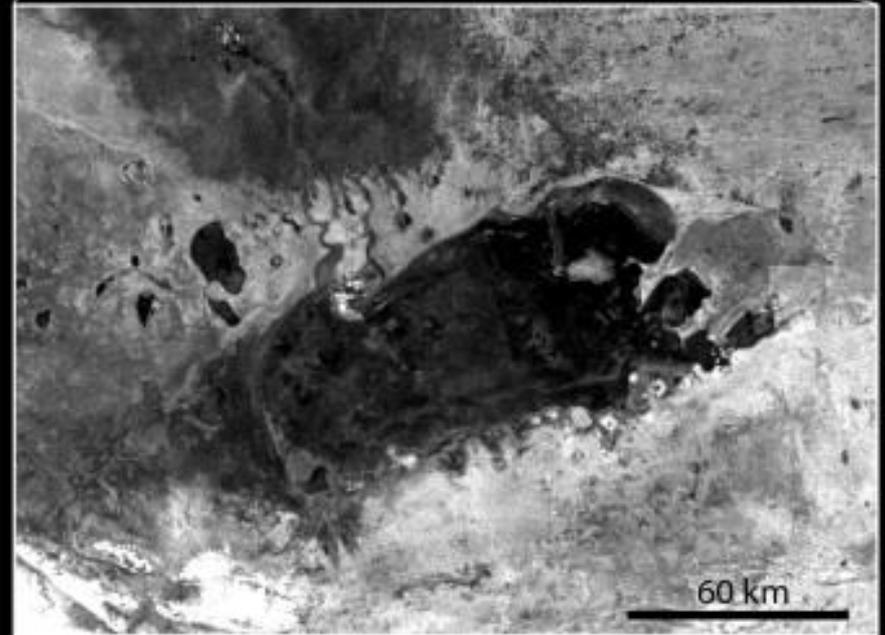
See (~ 15.000 km²) aus Kohlenwasserstoffen fällt stellenweise trocken und bildet Sedimente



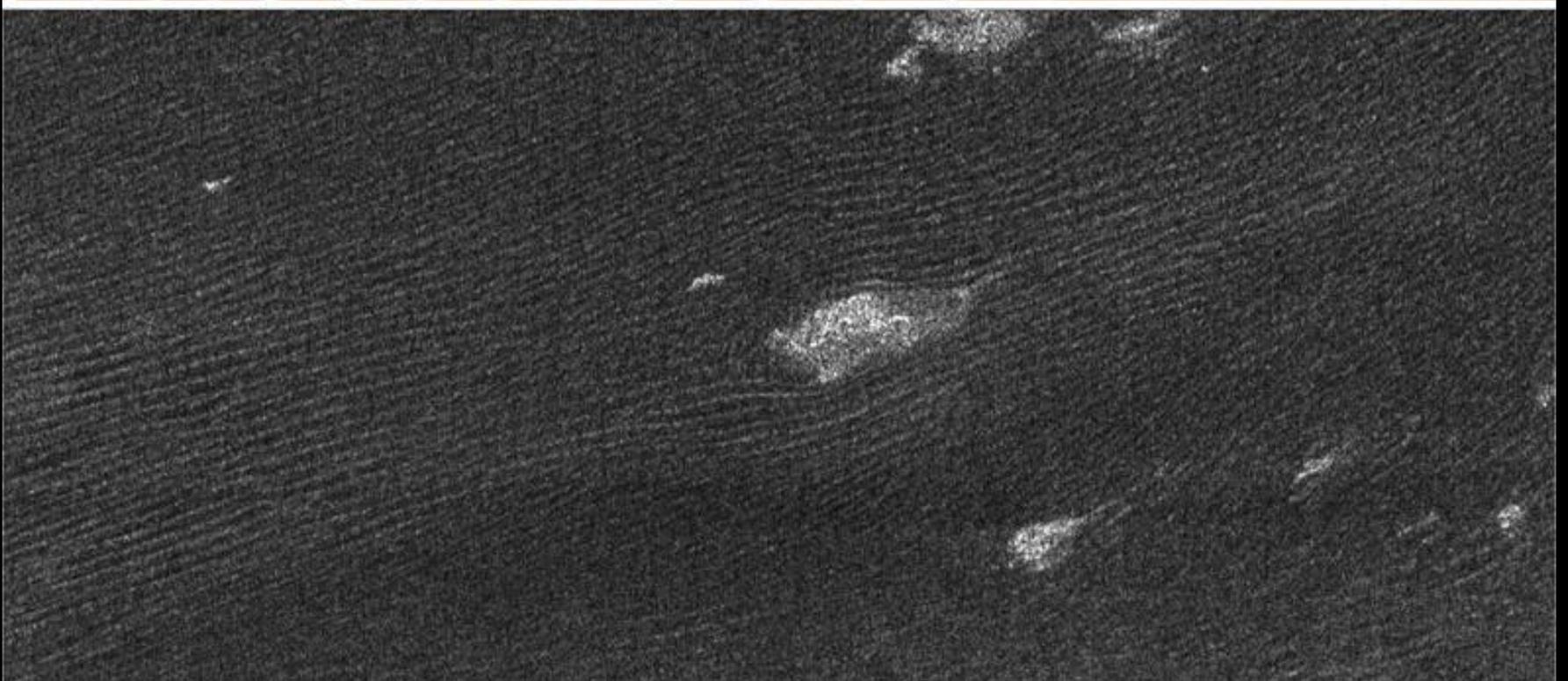
Ontario Lacus (72°S, 180°E), Titan
Cassini RADAR SAR image



Aus Untergrund steigt Wasser auf und verdunstet → Salzpfanne

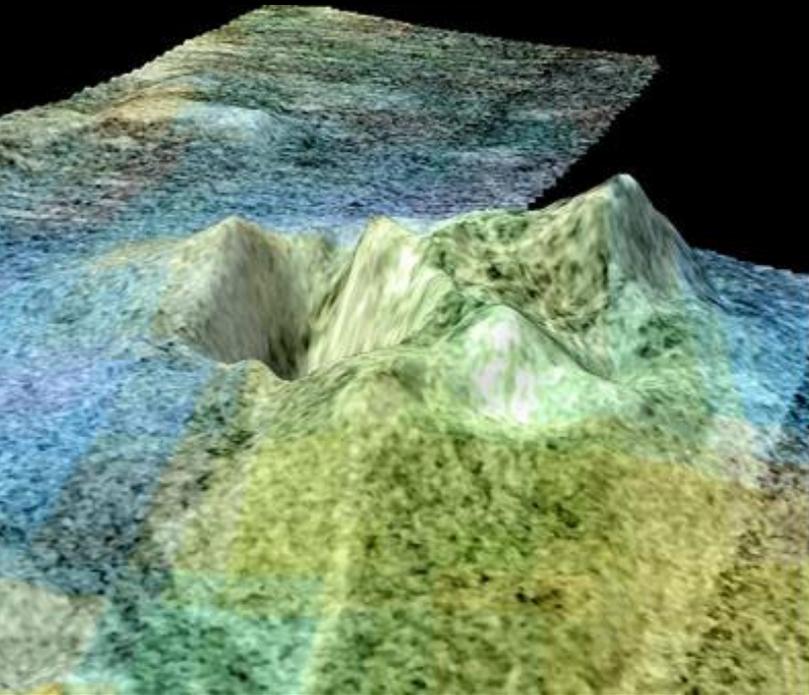


Etosha Pan (18°S, 16°E), Namibia
Envisat ASAR image



Titans Dünen (unten) im Vergleich zu Dünen in Namibia (oben)

Titan: Untergrund-Ozean und Leben?



Der mögliche Kryovulkan
Sotra Patera hat einen
typischen Krater © USGS

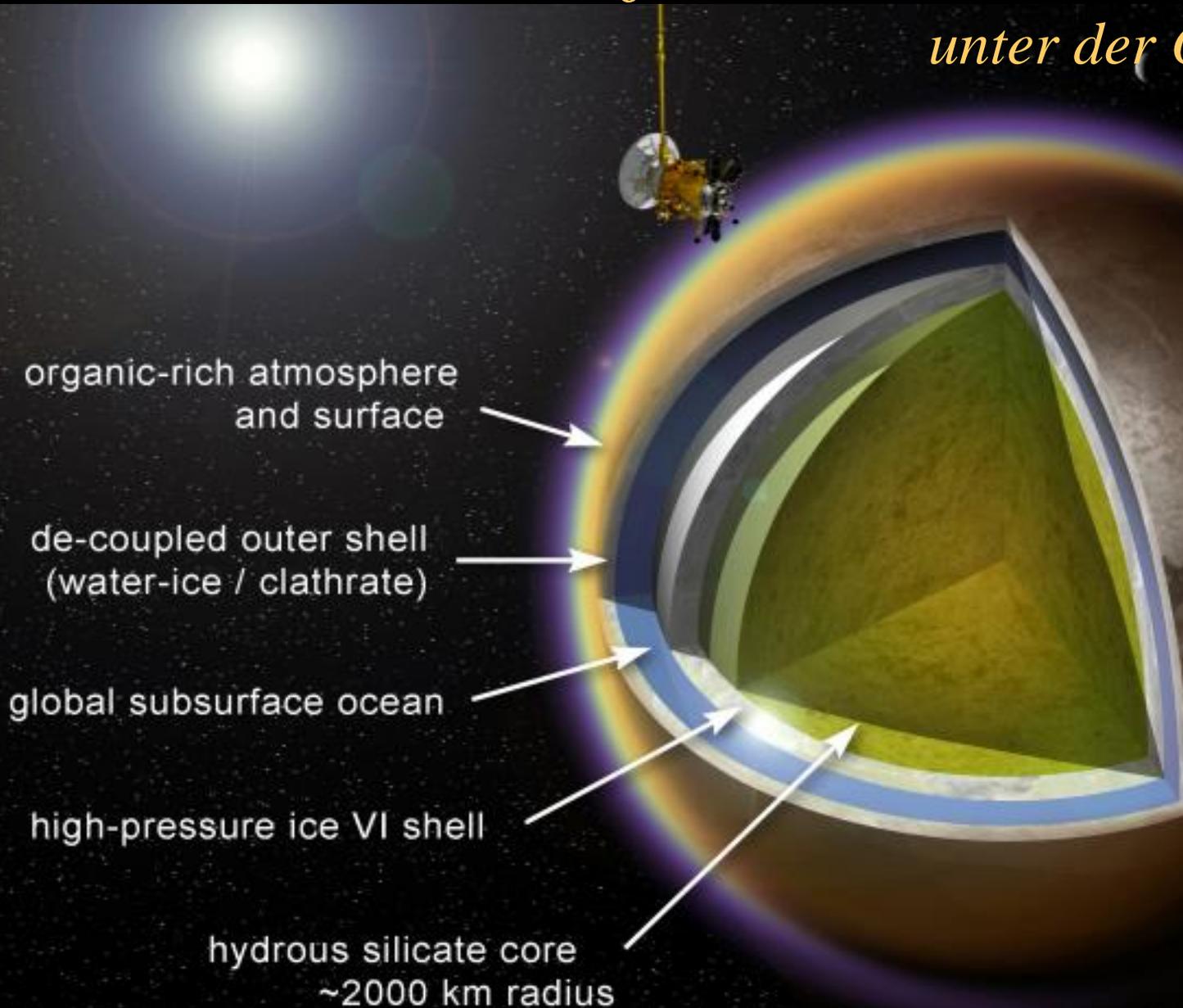
Jetzt wurden noch **Eisvulkane** entdeckt. Sie fördern offenbar flüssiges Wasser oder Methan aus dem Untergrund-Ozean an die Oberfläche.

Titans Atmosphäre ist reich an organischen Kohlenstoffverbindungen. Auf ihm bilden flüssiges und gasförmiges Methan ein Äquivalent zum Wasserkreislauf auf der Erde: Seen, Wolken und Regen.

Unter diesen Voraussetzungen ist niederes Leben denkbar, auch wenn es ganz anders aussieht, als Leben auf der Erde.

Titan: Innerer Aufbau

*mit globalem Ozean
unter der Oberfläche*





Enceladus
der Mond mit Eisvulkanen



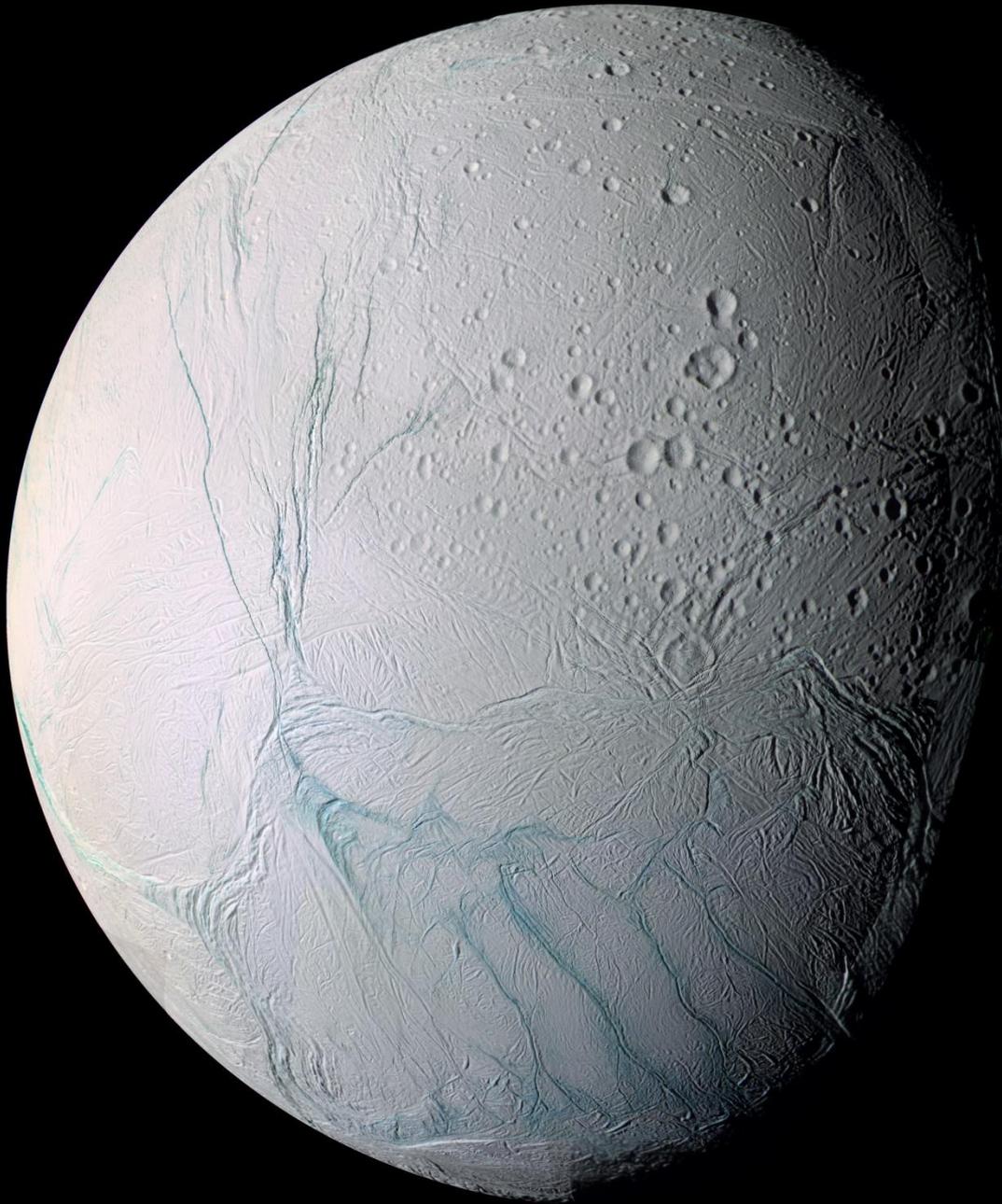
Enceladus



hellstes Objekt im Sonnensystem, junge Oberfläche,
aus reinem Wassereis wegen Kryo-Vulkanismus
(Gezeitenkräfte, chemische Prozesse im Innern)

→ 99 % Reflexion → $T_{\text{OF}} < -200 \text{ °C}$ (Saturn: -140 °C)

Enceladus



In der Südpolarregion
die blauen "Tigerstreifen"

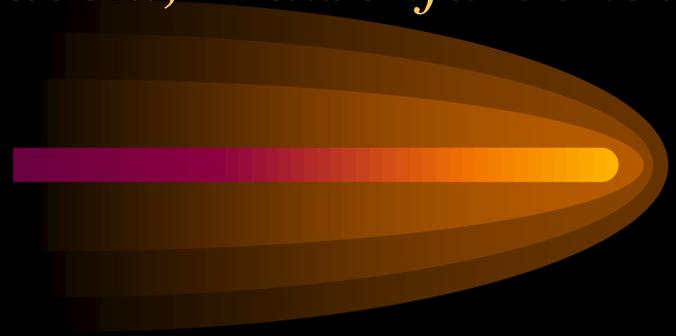
→ Bruchzonen infolge
geologischer Aktivität
des Eismonds

Schwache Schwingungen
beim Umkreisen Saturns:
→ äußere Eishülle kann
nicht fest bis ins Innere
gefroren sein

→ globaler Ozean unter
der eisigen Kruste

Eis-Geysire auf Enceladus im Gegenlicht

2005 entdeckt, Falschfarbenbild



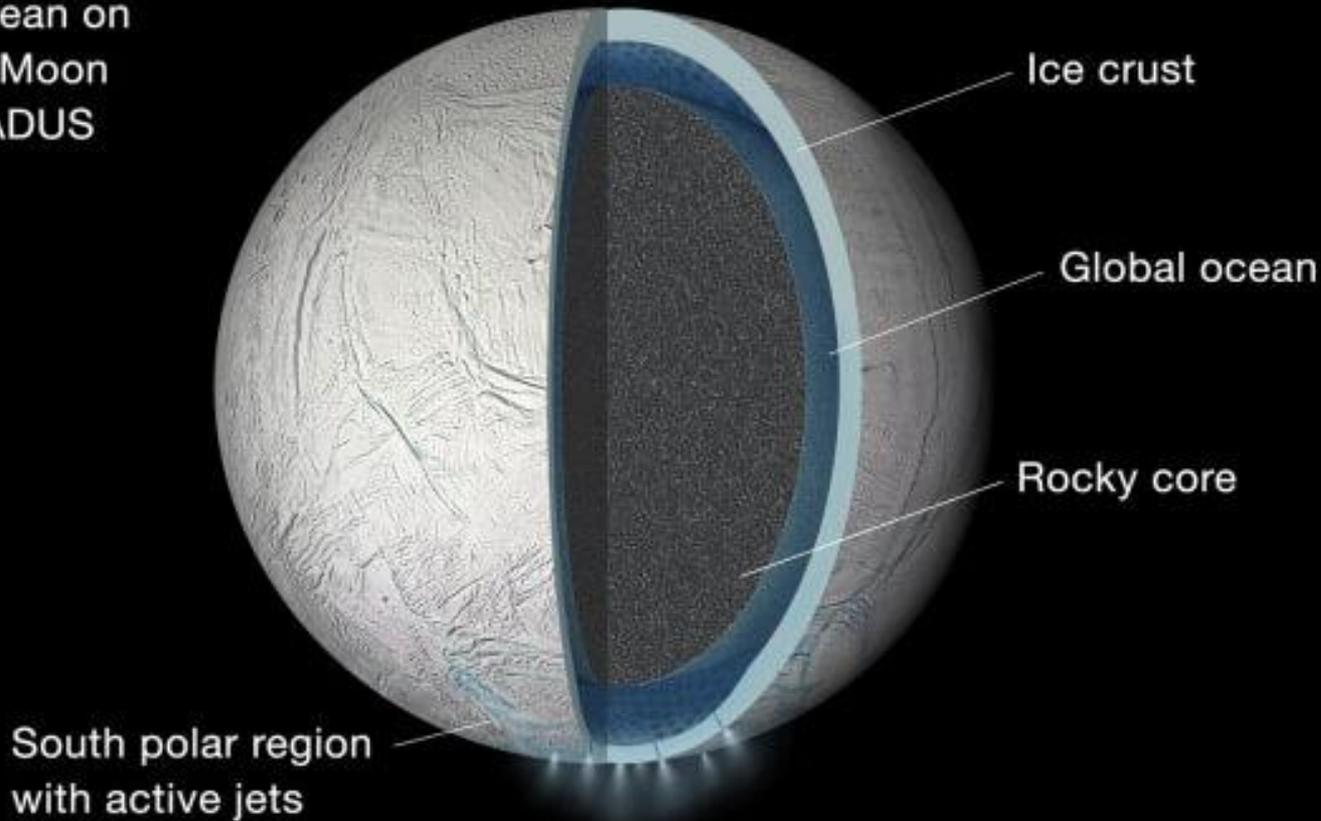
Einzigartig:

aktive Geysire, die Wasser und Eis-/SiO₂-Partikel im Südpol-Bereich in die Umgebung sprühen und so den **äußersten Saturn-Ring E** schaffen:

riesig, aber sehr dünn → keine Gefahr für Cassini.

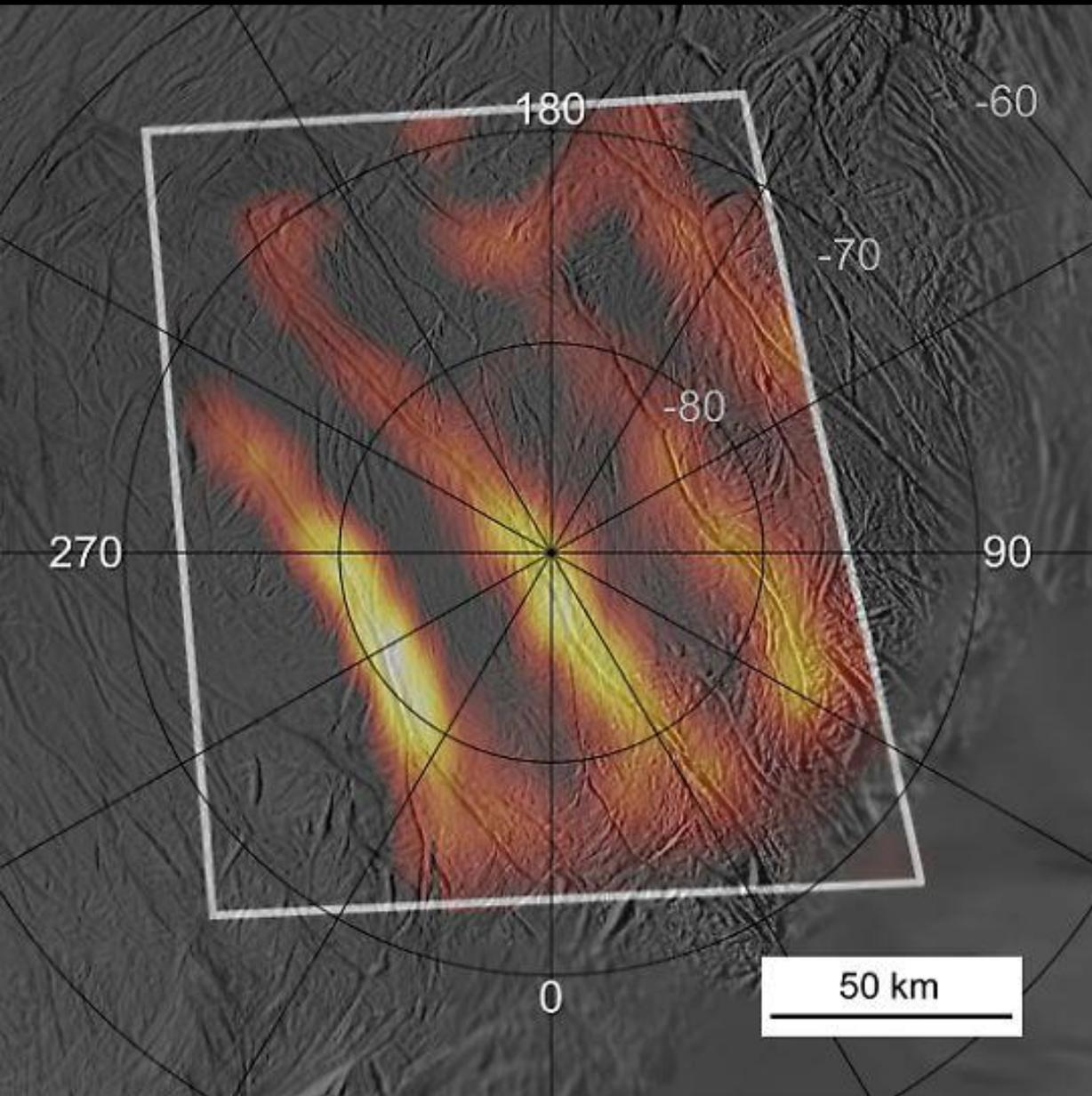
Globales Meer im Eismond Enceladus

Global Ocean on
Saturn's Moon
ENCELADUS



Der Ozean, 30-40 km unter dem Eis, umspannt über dem felsigen Kern den Mond. - An der warmen Grenze Kern/Ozean bilden **hydrothermale Prozesse SiO_2 -Partikel**, die mit dem warmen Wasser aufsteigen und durch die Brüche in der Eiskruste **auf die Oberfläche und in die Umgebung** gelangen.

Enceladus: Wärmequellen unter dem Südpol



Heat Maps des Infrarot-Spektrometers.

"Wärme": zwar immer noch etwa -100 °C kalt, aber statt sonst -200 °C! Innen bis über +100 °C!

Mögliche Ursachen des Temperaturunterschieds:

- Gezeiteneinwirkung durch Saturn
- restlicher radioaktiver Zerfall

Hydrothermale Prozesse an der Grenze Ozean - Gesteinskern

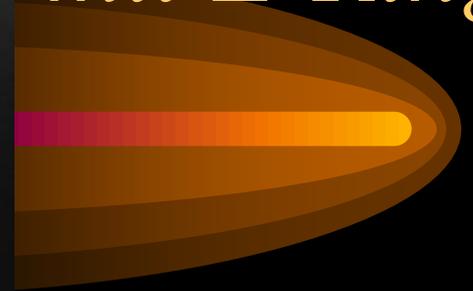
„In hydrothermalen Systemen auf der Erde reagiert eisenhaltiges Gestein mit Wasser und erzeugt so molekularen Wasserstoff“, Hunter Waite et al., SwRI

Dieser molekulare Wasserstoff dient dann als **Energiequelle für Mikroorganismen**, reagiert dabei mit Kohlendioxid und produziert Methan.

„Auf der heutigen Erde treiben solche geochemischen **Energiequellen blühende Ökosysteme an**, selbst bei völliger Abwesenheit von Sonnenlicht.“

→ **Niederes Leben unter der Eiskruste denkbar?!**

Enceladus mit E-Ring



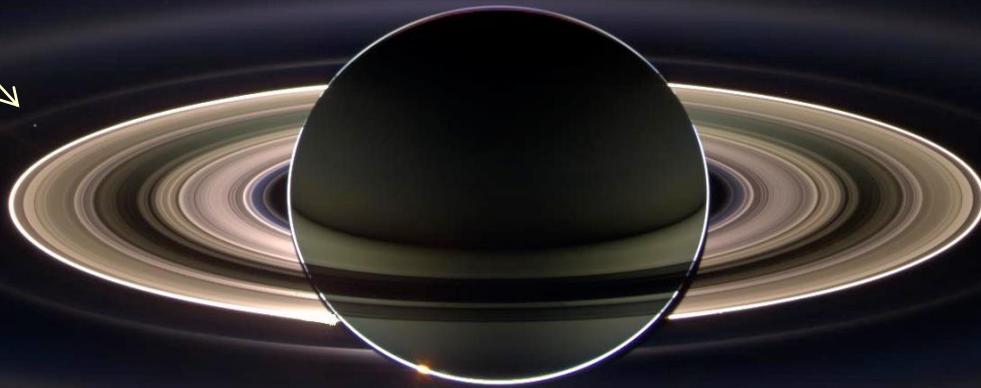
Geysire am Südpol schleudern große Mengen μm -großer Partikeln in die Höhe. Die, welche dem Schwerefeld des Mondes entkommen, verteilen sich entlang des Orbits sowie in radialer Richtung.

Der E-Ring ist etwa 300.000 km breit (zwischen 3 bis 20 Saturnradien), dabei aber extrem dünn.

Saturn im Gegenlicht - mit E-Ring

Cassini 2007

Erde

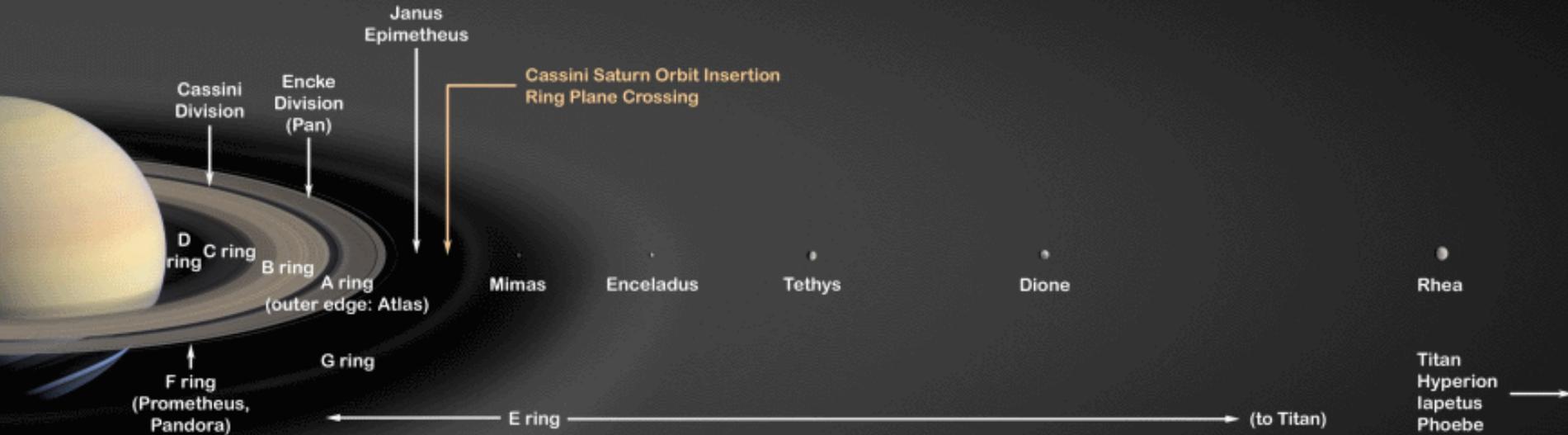


Die Saturn-Monde

Zur Zeit (10-2017) sind 62 Monde bekannt:

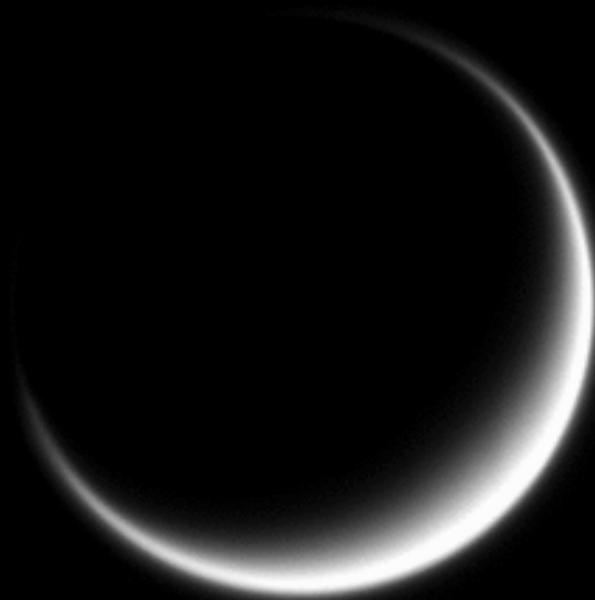
- **große Monde**
(Durchmesser in km / große Halbachse in Tkm):
Mimas (395/186), Enceladus (504/238), Tethys (1066/295),
Dione (1123/377), Rhea (1529/377), **Titan (5150/1222)**
- diese und die kleinen Monde bis ca. 400 Tkm Abstand
laufen nahezu **auf Kreisbahnen und in der Ringebene**
- Iapetus weiter außen (1436/3560) hat 7.6° Neigung
- die kleinen Monde noch weiter außen bewegen sich auf
stark exzentrischen Bahnen mit beliebigen Neigungen
→ **eingefangene Asteroiden und Kometen**

Saturnsystem mit den schwachen Außenringen G und E



Die aus den südpolaren Geysiren von Enceladus ausgespuckten eisigen Partikel bilden den E-Ring, durch den elf weitere Monde pflügen. Diese haben eine mit anderen Monden vergleichbar **hohe Albedo**, die sie dem steten enceladischen Eisniederschlag verdanken.

Drei sichelförmige Saturnmonde: Rhea, Titan, Mimas



Titan wirkt verschwommen, wegen seiner dunstigen, dichten Atmosphäre, die das Sonnenlicht streut.

Rhea (links oben) und Mimas wirken rau: sie sind stark mit Kratern übersät:

Zeugen ihrer gewalttätigen Entstehung.

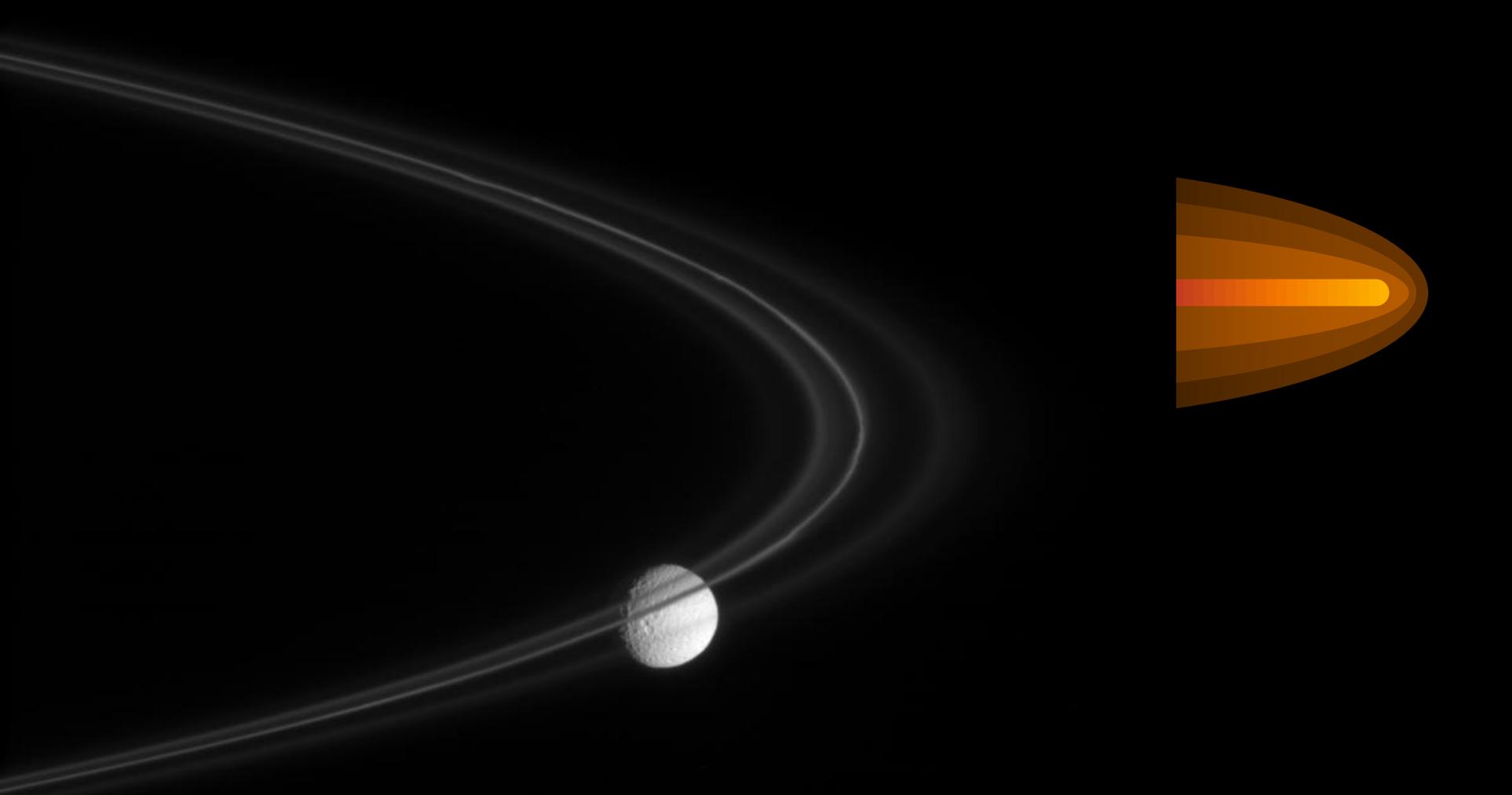
Cassini: Ochsenauge Enceladus vor Thetys



Rotlichtbild der Cassini NAC vom 24.09.2015 aus 2.1 Mio km Distanz zu Enceladus und 2.6 Mio km zu Thetys:

→ zeigt etwa die relativen Größen der beiden Monde (504 zu 1062 km).

Blick gegen die unbeleuchtete Seite aus 0,34 Grad unterhalb der Ringebene.



18. Nov. 2017

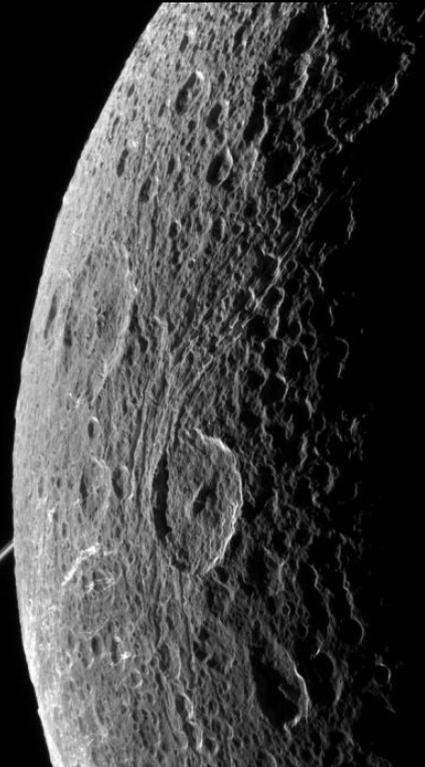
Ten years ago today, the spacecraft peered through the smoke-sized ice particles of Saturn's F ring, toward the cratered face of Mimas. More:

<https://go.nasa.gov/2hHGgEh> [#SaturnSaturday](#)

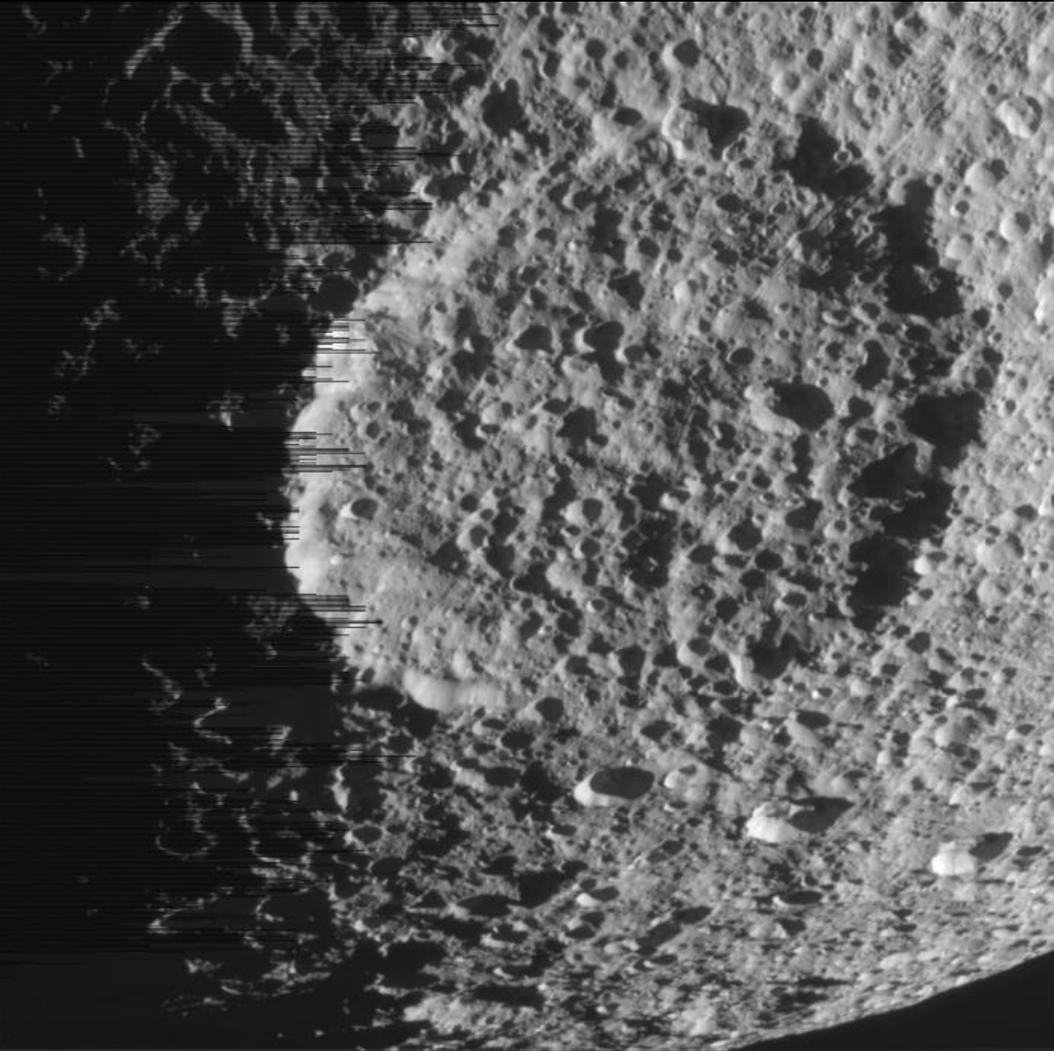
Dione vor Saturn mit Ring und Enceladus

← Aufnahme 15.06.2015
aus 77.000 km Distanz

↓ Dione mit
Einschlagkratern und
Dehnungsrissen im Eis



Krater Penelope auf Tethys

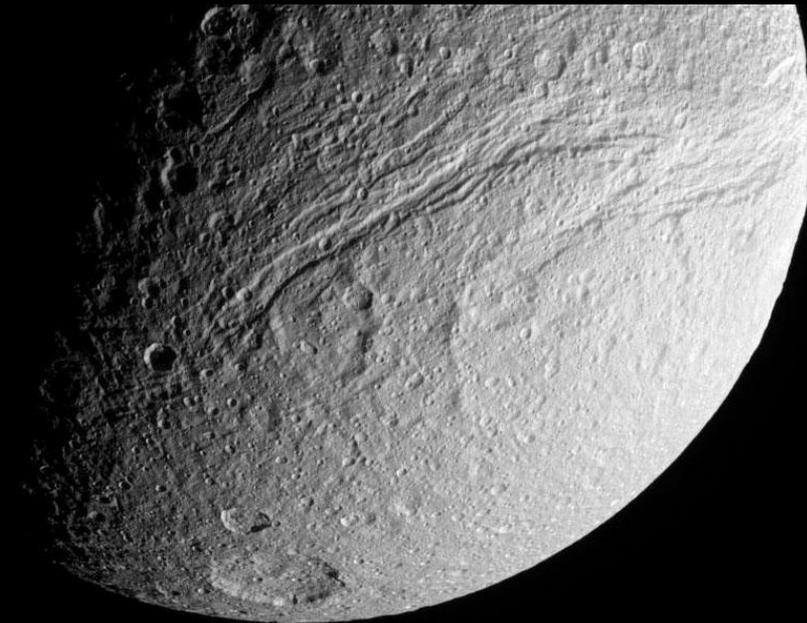


Der große Krater ist sehr alt:

→ darin zahlreiche kleinere
Einschlagkrater.

Nur der Randwall ist noch
gut erhalten.

Ithaca Chasma: die große Kluft

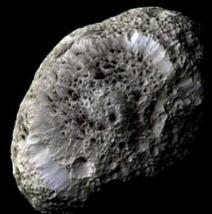
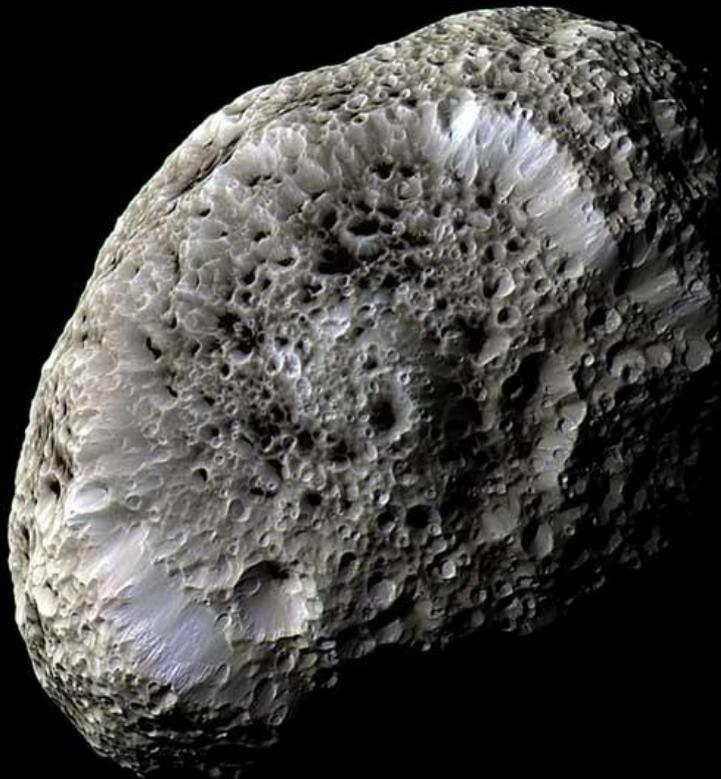


Hyperion

Iapetus

$d = 0,54 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ poröses Wassereis mit wenig Silikaten, 360x280x225 km „Bruchstück“

Äquatorialer Wulst bis 13 km, „vorn“ dunkle (Albedo ~ 0.04) hinten helle ($\sim 0,5$) Hemisphäre 1436 km \emptyset



Iapetus – der schwarz-weiße Mond



Seine in "Fahrtrichtung" liegende Hemisphäre ist so dunkel wie Kohle. Dagegen wirft die Heckseite rund 60 Prozent des Sonnenlichts zurück. Grund für die dunkle Bugseite: auf ihr hat sich dunkler Staub von den äußeren kleinen Saturnmonden abgelagert. Dieser erwärmt sich durch die Sonneneinstrahlung stärker als die helle Rückseite → über Milliarden von Jahren sublimierte immer mehr Eis auf der dunklen Seite.

Das große Finale

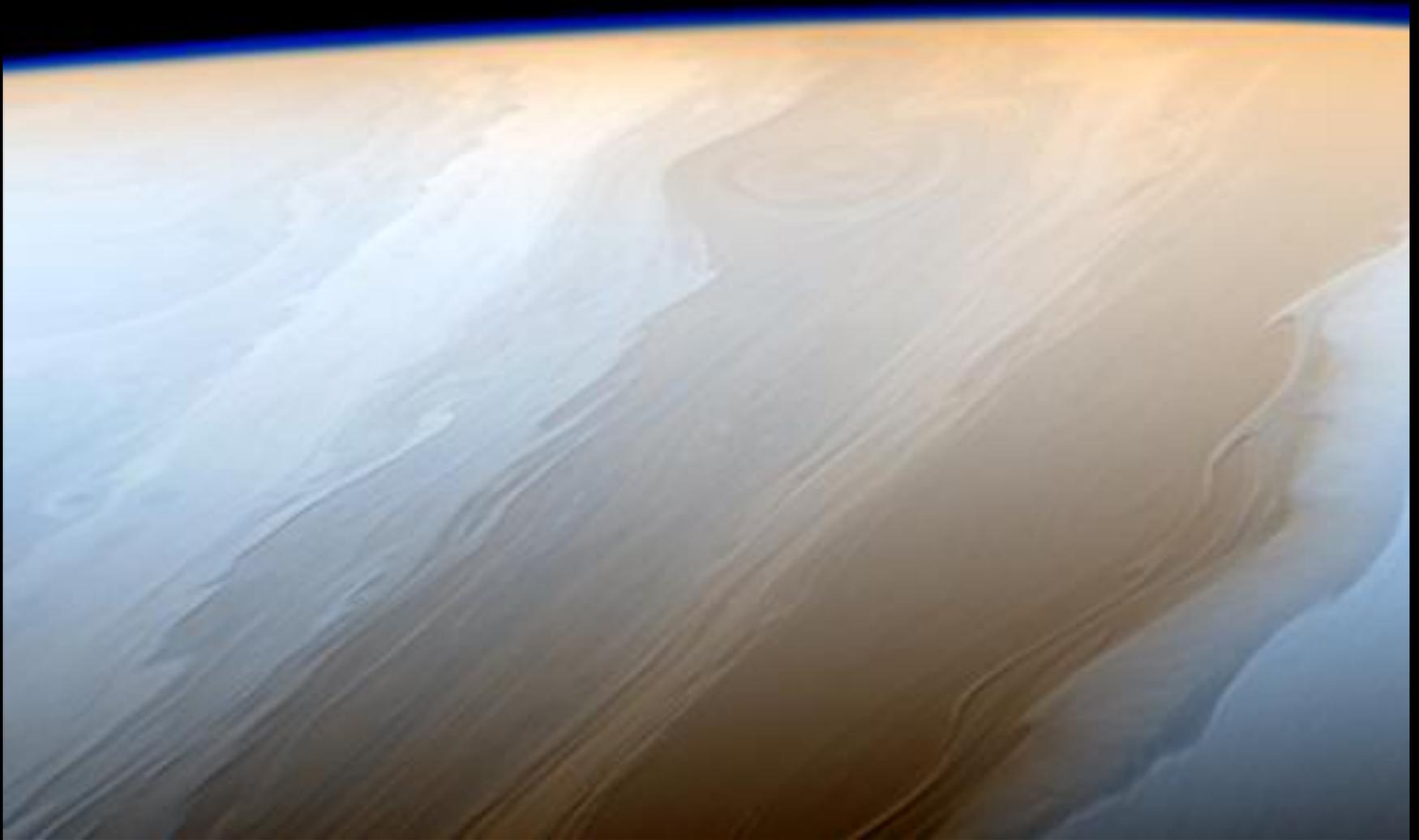
Die letzten 22 Orbits

Ende 04 - 15.09.2017



Gewagtes Finale: 22 Passagen durch die nur 2.400 km breite Lücke zwischen dem Planeten und dem innersten Ring:

- detailreiche Nahaufnahmen von Saturns Gashülle, den inneren Ringen und den kleinen Monden
- Daten zum Magnetfeld, den Polarlichtern und der Atmosphäre Saturns sowie den im Gasriesen stattfindenden Prozessen



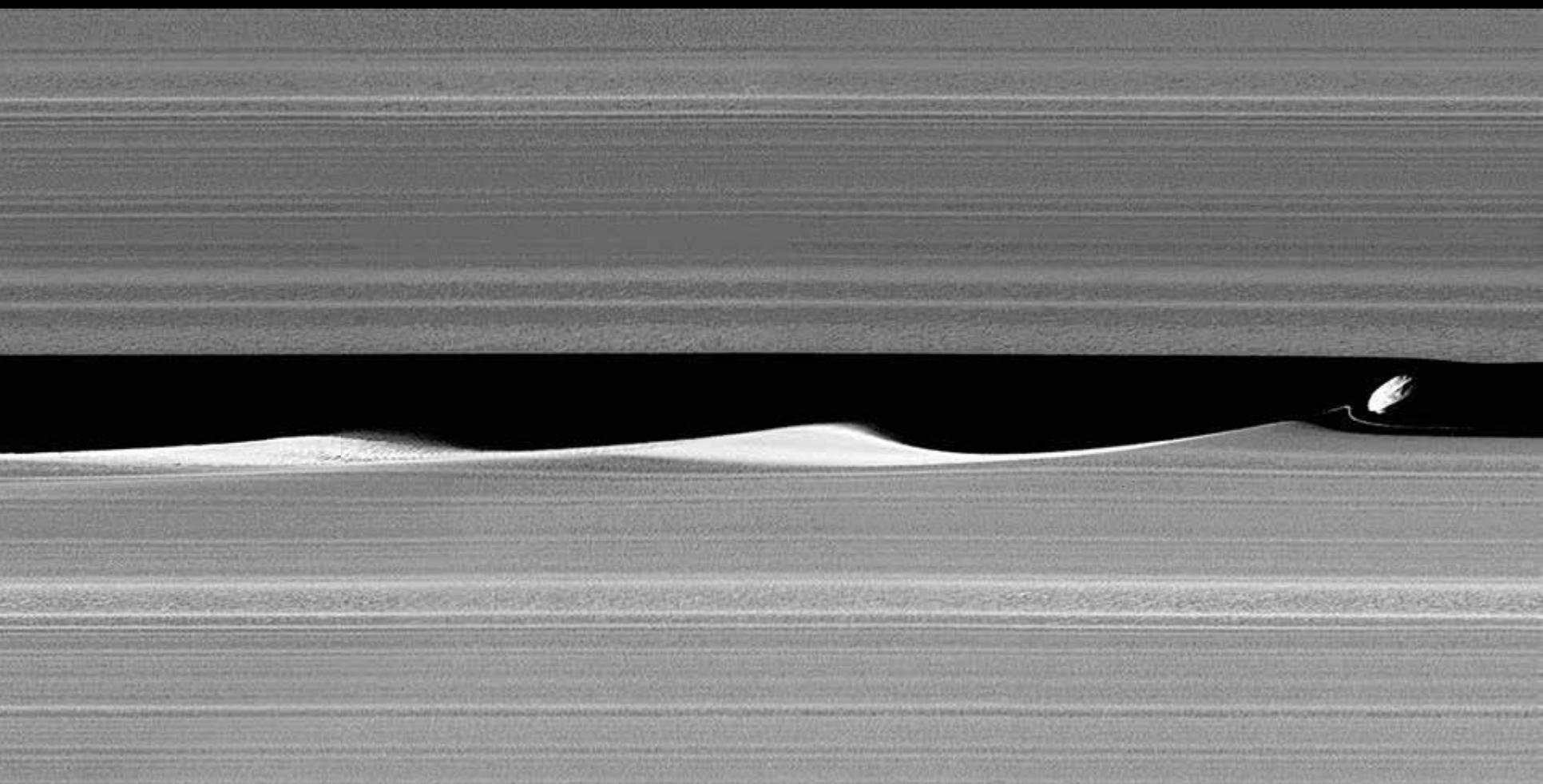
14. August 2017 Saturn im Infraroten

Strukturen der Wolkenoberfläche unterhalb der Dunstschichten sichtbar:

Wirbel und Winde bis 600 km/h,

Blaue Schicht oben: höhere Atmosphäre mit wenig Dunst

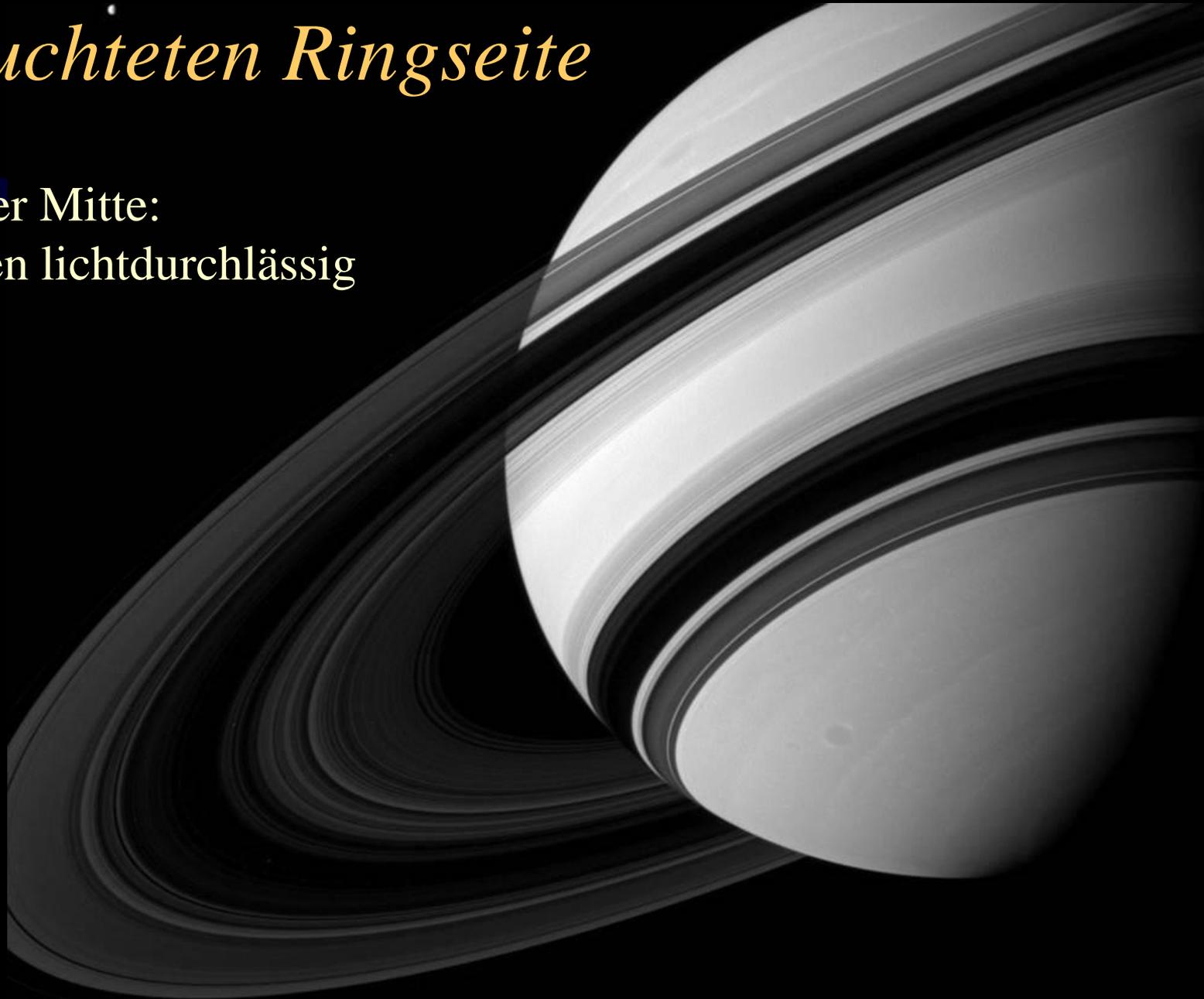
Daphnis schlägt Wellen in Saturns A-Ring



Der nur 8 km große Mond hat mit seiner Schwerkraft die rund 40 km Keeler-Lücke in den A-Ring gefegt. Daphnis zieht die Ringpartikel an und lenkt sie geringfügig von ihren Bahnen ab, so dass sie Wellen bilden. Diese ragen bis zu 4 km über die Ringebene hinaus.

Saturn von der unbeleuchteten Ringseite

B-Ring in der Mitte:
am wenigsten lichtdurchlässig



Saturn-Ringe von innen

Cassini durchflog am 20. August 2017 die Ringebene. Mit Saturn »im Rücken« blickte sie auf die Ringe, wie sie aus ihrer Sicht immer schmaler wurden. So würde das Ringsystem von verschiedenen Breiten auf Saturn erscheinen.

01:17 UT

01:17 UT

01:17 UT

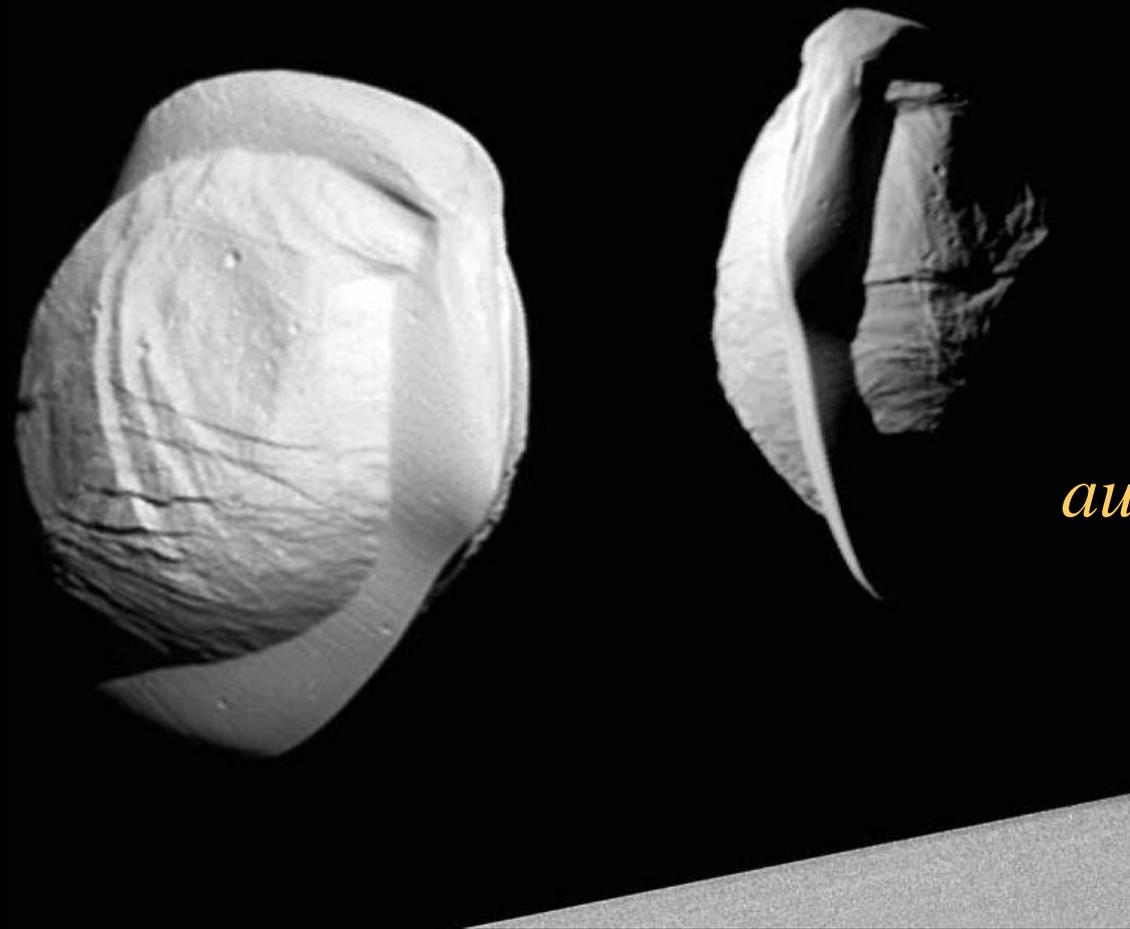
01:18 UT

01:18 UT

01:18 UT

01:18 UT

01:18 UT



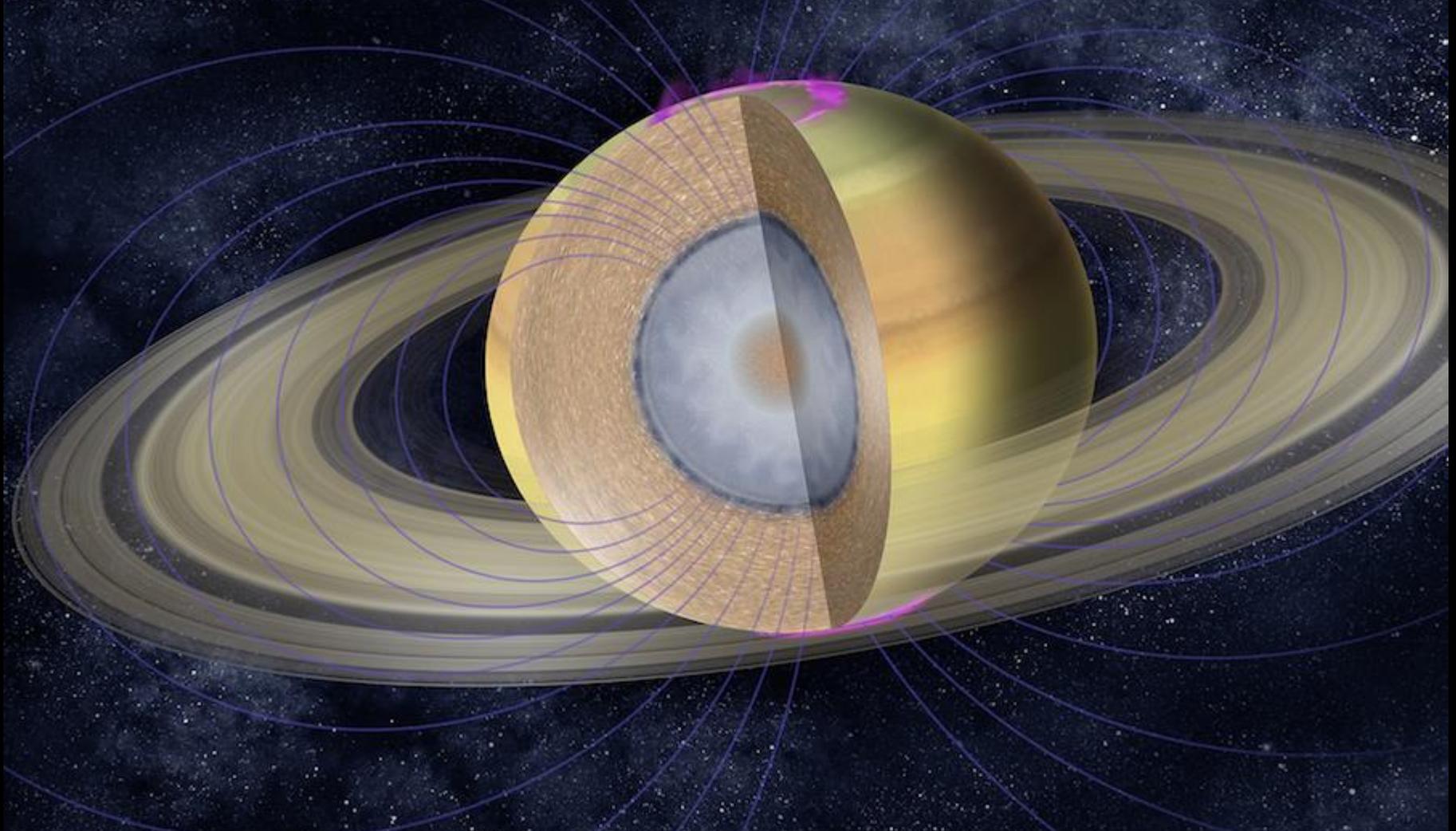
Mond Pan mit „Hutkrempe“

*März 2017,
aus 25.000 km , 150 m/pixel
Ø bis 35 km max*

Bizarre Struktur durch feine Ringpartikel, angesaugt über Jahrtausende.
Dünne „Krempe“ um den Äquator, da sich Pan exakt in der Ringebene bewegt, und der Ring nur 10 bis 100 m dick ist.

Krempe ragt mehrere km über die eigentliche Oberfläche. Sie muss sich verfestigt haben - durch Wassereis - , da sie kleine Einschlagkrater zeigt.

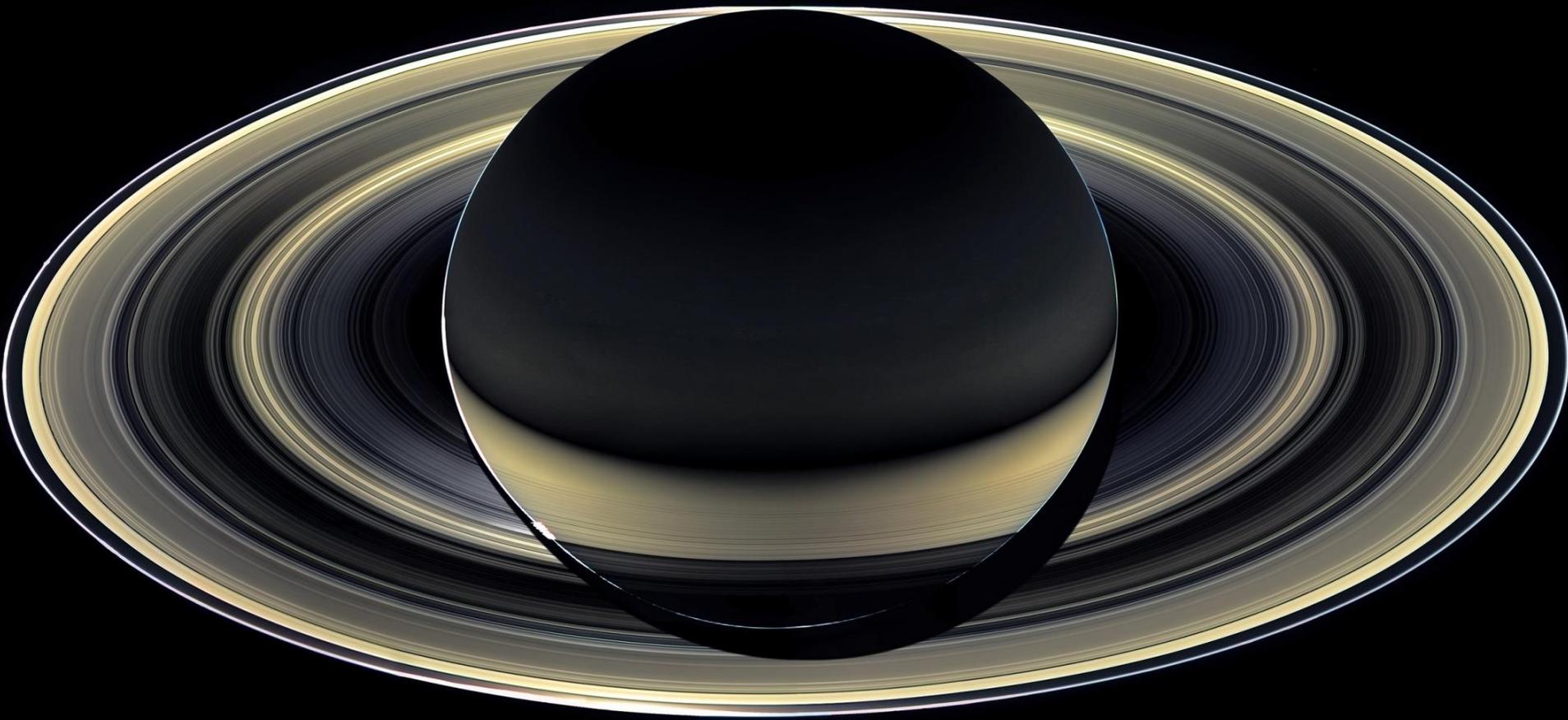
Ähnliche Erscheinung bei **Daphnis und Atlas**



Innere Struktur Saturns:

- Kern aus schweren Elementen (orange)
- Schicht aus flüssigem metallischem Wasserstoff (grau)
- Hülle aus molekularem Wasserstoff-Gas (braun)

Das Magnetfeld entspringt oben aus der metallischen H-Schicht.



Cassini im Schatten Saturns 13. April 2017, Mosaik der WAC

Sichtbar ist das von den Ringpartikeln vorwärts gestreute Sonnenlicht
→ ergibt **Helligkeitsinversion**: der dichte B-Ring erscheint dunkler
als die dünneren durchlässigeren Ringe

NASA / JPL-Caltech / SSI / Ian Regan

Cassinis letztes Bild von Saturn



14.09.2017 19:59 Uhr
Weitwinkelkamera

Wolkenoberfläche:
unten die Schatten der
Saturnringe,
oben Wolkenstrukturen.

Hier trat Cassini in die
Gashülle ein und
verglühte.

Großes Finale einer großen Mission



15.09.2017: Cassini tritt mit 33 km/s in die Atmosphäre Saturns ein
und verglüht

NASA/JPL-Caltech

→ Irdische Mikroben können nicht die Saturnmonde infizieren!

Zusammenfassung

Die Cassini-Huygens-Mission war unglaublich erfolgreich!!

Viele neue Erkenntnisse:

- Saturn hat eine enorm aktive Atmosphäre, mit Megastürmen
- Am seinem Nordpol herrscht ein riesiger sechseckiger Sturm
- Seine riesigen Ringe sind extrem dünn: nur 10-100 m;
sehr unterschiedliche Dichte und Zusammensetzung (Radio-Analyse)
- Kleine (Hirten-) Monde in den Ringen: schaffen Lücken, schlagen Wellen, halten Ringe zusammen
- Kleine Monde in den Ringen mit Bauchbinden
- Landung der Tochtersonde Huygens auf Titan:
unter der dichten Atmosphäre eine Wüstenlandschaft:
bei -200 °C , mit Methanseen statt Wasser, aber mit Wasserozean
unter der Oberfläche: niederes Leben möglich?
- Kleinmond Enceladus: unter der Eiskruste ein globaler Ozean,
Kryovulkanismus um den Südpol: niederes Leben darin denkbar,
liefert Staub/Eis-Partikel für diffusen E-Ring
- Mond Iapetus: in Flugrichtung schwarz, hinten weiß

Video von der Huygenslandung auf Titan



<https://www.welt.de/wissenschaft/weltraum/article161280444/Gibt-es-hier-Leben-Nasa-veroeffentlicht-atemberaubende-Bilder.html>



*Vielen Dank
fürs Mitdenken*

Literatur / Quellen (1)

- <https://saturn.jpl.nasa.gov/resources/7777>
[The Saturn System Through the Eyes of Cassini \(e-Book\) – NASA](#)
- https://photojournal.jpl.nasa.gov/jpegMod/PIA06175_modest.jpg
- Wikipedia: Cassini Huygens, Saturn, Titan, Enceladus ...
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Cassini-Huygens#/media/File:PIA16198.jpg> Bilderserie mit Erläuterungen
- Tilmann Althaus: „Die zehn wichtigsten Entdeckungen von Cassini“
Sterne und Weltraum Wissen, 12. 9.2017
- http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10398/1759_read-24181/ 13 Jahre in der Welt des Saturn, seiner Ringe und Monde
- <http://www.n-tv.de/mediathek/bilderserien/wissen/Der-von-den-Toten-auferstandene-Mond-article16231156.html> (28.10.2015, Enceladus - Außenposten des Lebens?)
- <https://news.astronomie.info/ai.php/bulletin/d20050275>
Dossier: Raumsonde Cassini in Saturn-Umlaufbahn

Literatur / Quellen (2)

- www.scinexx.de/wissen-aktuell-16659-2013-09-17.html
Titan: Saturnmond hat aktive Eisvulkane
- <https://astronomynow.com/2017/10/19/cassini-results-still-keeping-scientists-busy/>
- F. Postberg, Th. Dambeck: „Heißes Wasser in der Tiefe des Enceladus“ Spektrum Spezial – Die Rätsel des Sonnensystems, S. 44
- Tilmann Denk: „Cassinis großes Finale“ Sterne und Weltraum 4-2017
- Tilmann Althaus: „Prächtiger Saturn – Raumsonde Cassini verabschiedet sich vom Ringplaneten“ Sterne und Weltraum 10-2017
- SuW Basiswissen: „Steckbrief: Saturn - Planet der Ringe“ 21.03.2014
- Carolyn Porco: „Saturn: Abschied von Cassini“ Spektrum.de 14.09.2017
- ntv.de Wissen: „Saturns Nordpol wechselt die Farbe“ 25.10.2016
- Stefan Deiters: „Ein Methan-See auf Titan“ Astronews.com 27.4.2016