

**ASTRONOMIA DO SISTEMA SOLAR  
(AGA-292)**

# **ANÉIS PLANETÁRIOS**

**Enos Picazzio  
IAG/USP**

NOTAS DE AULA. NÃO HÁ PERMISSÃO DE USO PARCIAL OU TOTAL DESTE MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES.

## Histórico

1610: Galileu observa pela 1a. vez;  
- NÃO reconhece estrutura de anel  
(instrumentação ruim)  
- interpreta como sistema múltiplo

1659: Christian Huygens (1629-1695)  
distingue disco fino e plano

1675: Giovanni D. Cassini  
(1625-1712) distingue 2 anéis,  
separados por uma divisão escura  
(Divisão de Cassini)

1857: - James C. Maxwell mostra que  
anel sólido é instável, se fragmentaria  
- proposta: formados por partículas  
sólidas que orbitam Saturno

1895: - o deslocamento Doppler da luz solar espalhada por diferentes partes  
do disco é compatível com movimento circular, obedecendo a Lei de Newton

## Anéis de Saturno

Looking at Sun from Iapetus  
1889/11/02 10:30:00 UTC

obs 5.5 S 173.7  
fov 1.9 degrees  
dist 1.4 billion km

Venus  
Mars



## Características das partículas

## Anéis de Saturno

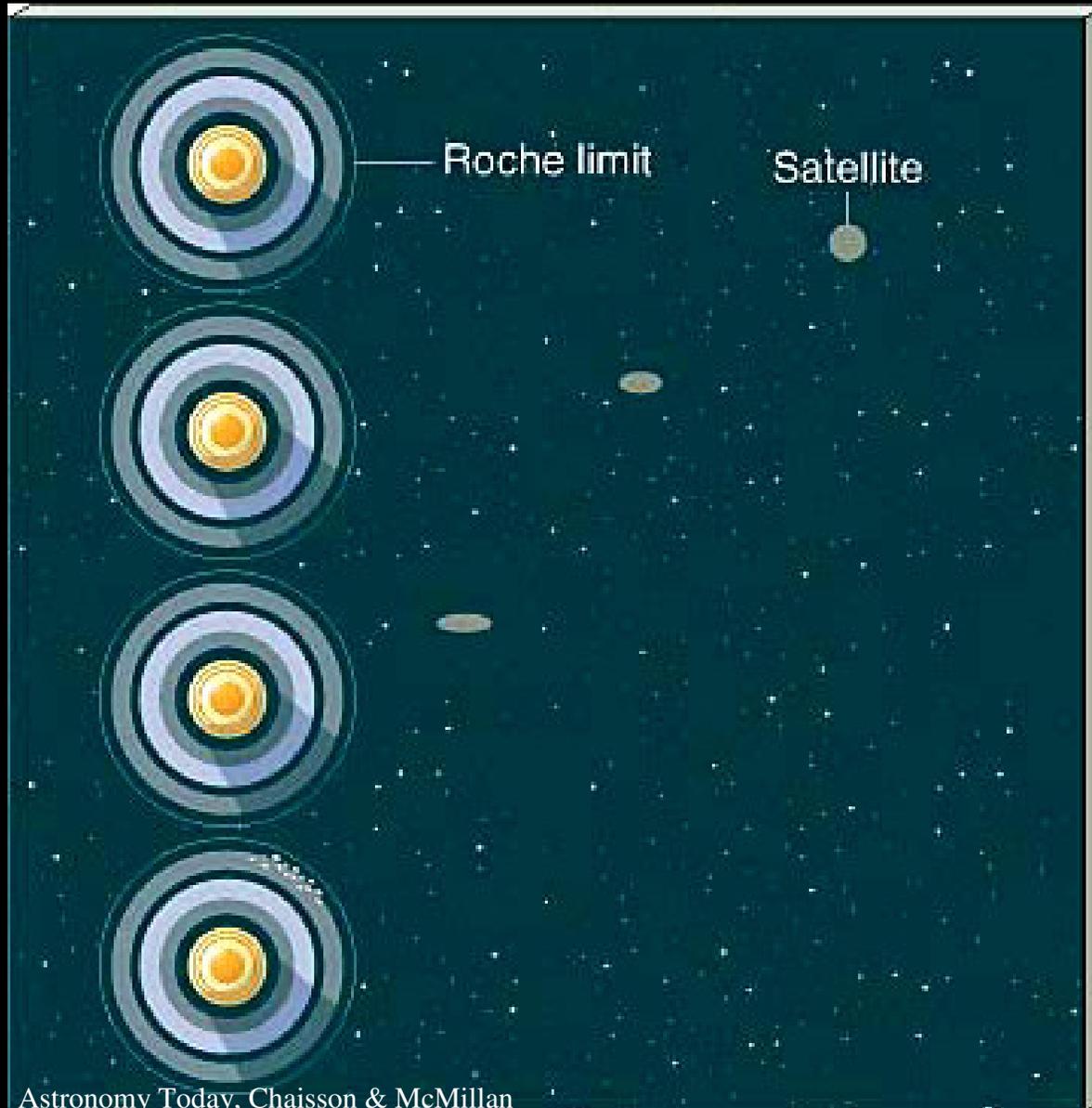
- albedo  $\sim 0,8$  (refletem  $\sim 80\%$  da luz solar incidente)
- medidas no infravermelho (anos 70): confirmam presença de gelo
- Voyagers:
  - (radar); partículas variam de fração de milímetro a dezenas de metros
  - descobrem os anéis D e E
  - anéis são muito finos e transparentes à luz,
  - situados no plano equatorial de Saturno
  - colisão é um processo contínuo, responsável pela pulverização das partículas
  - assimetria é resultante da gravitação
  - estão dentro do “Limite de Roche”

Looking at Sun from Iapetus  
1889/11/02 10:30:00 UTC

obs 5.5 S 173.7  
fov 1.9 degrees  
dist 1.4 billion km

Venus  
Mars

# Limite de Roche



Edouard Roche estudou o “limite de instabilidade de maré”:

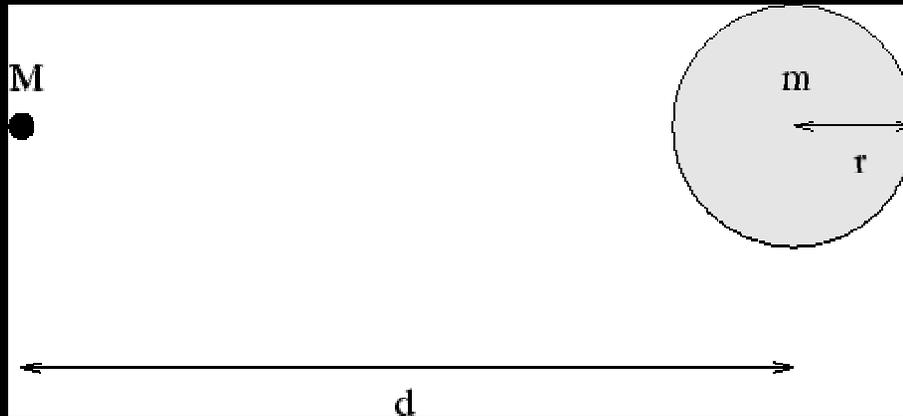
devido à proximidade, as forças de maré podem superar as forças de coesão do material do satélite, e o fragmenta

A expressão genérica é:

$$d = 2,44 \left( \frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R$$

Se as constituições do planeta e do satélite **forem iguais** ( $\rho_M = \rho_m$ ), o Limite de Roche equivale a 2,4 raios do planeta

# Limite de Roche

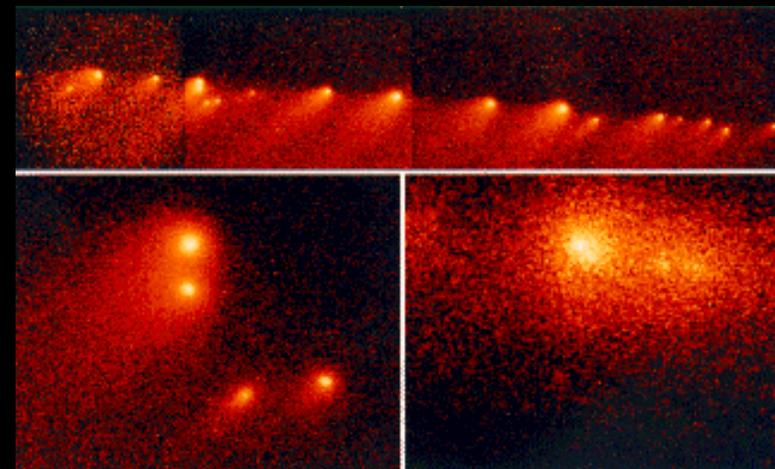
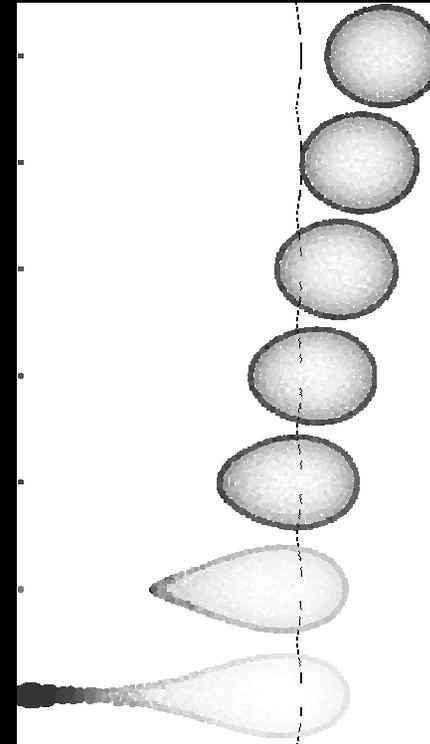


**Satélite:** massa  $m$ , raio  $r$ , distância  $d$

**Planeta:** massa  $M$

O limite de Roche é a distância para a qual um pedaço do material de massa arbitrária  $\mu$  da superfície do satélite, é mais fortemente atraído por  $M$  do que gravitacionalmente por  $m$ :

$$\frac{2GM\mu r}{d^3} = \frac{Gm\mu}{r^2} \Rightarrow d = 0,78 \left( \frac{M}{\rho_m} \right)^{1/3}$$



## Limite de Roche

Em 1974, Hans R. Aggarwald e Vern R. Oberbeck estudaram o caso de ruptura por maré de corpos esferoidais sólidos, rochosos ou gelados, mantidos coesos por forças de tensão intrínsecas de seu material. Encontraram que, para satélites desse tipo, com diâmetros maiores do que 40 km, a distância mínima que eles podem chegar de seu planeta sem quebrar é:

$$d = \left(2M/m\right)^{1/3} dr.$$

Qual a menor distância que a Lua pode chegar da Terra sem se romper?

$$M_{\text{Terra}} = 5,97 \times 10^{24} \text{ Kg}$$

$$R_{\text{Terra}} = 6370 \text{ Km}$$

$$M_{\text{Lua}} = 7,35 \times 10^{22} \text{ Kg}$$

$$R_{\text{Lua}} = 1738 \text{ Km}$$

$$\rho_{\text{Terra}} = \frac{M_{\text{Terra}}}{\frac{4}{3}\pi R_{\text{Terra}}^3} = 5514 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{Lua}} = \frac{M_{\text{Lua}}}{\frac{4}{3}\pi R_{\text{Lua}}^3} = 3342 \text{ kg/m}^3$$

$$d = \left(2M/m\right)^{1/3} dr.$$

**No caso dos anéis, as partículas são pequenas e suas forças coesivas superam as forças de maré.**

$$d = 1,38 \left( \frac{5514 \text{ kg/m}^3}{3342 \text{ kg/m}^3} \right)^{\frac{1}{3}} 6370 \text{ km} = 7527 \text{ km}$$

# Limite de Roche

## Anéis de Saturno

Anéis	Raio externo		Raio externo (km)	Largura	
	(km)	(planet radii)		(km)	(km)
D	67,000	1.11	74,700	1.24	7,700
C	74,700	1.24	92,000	1.53	17,300
B	92,000	1.53	117,500	1.95	25,500
Cassini Division	117,500	1.96	122,300	2.03	4800
A	122,300	2.03	136,800	2.27	14,500
Encke gap*	133,400	2.22	133,700	2.22	300
F	140,300	2.33	140,400	2.33	100
E	180,000	3.00	480,000	8.00	300,000

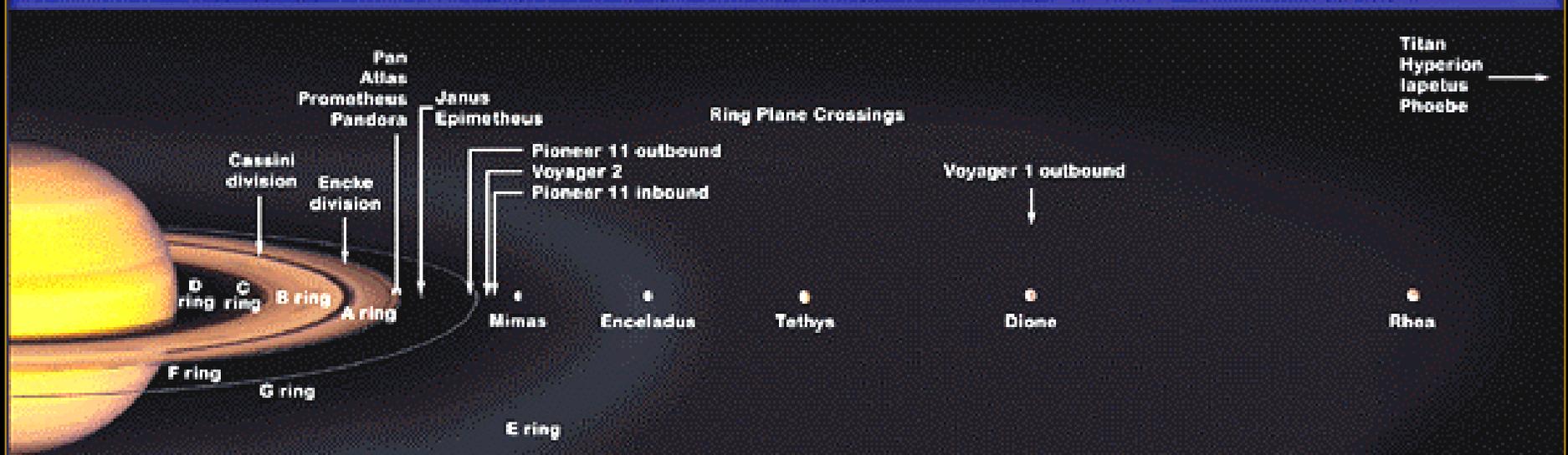
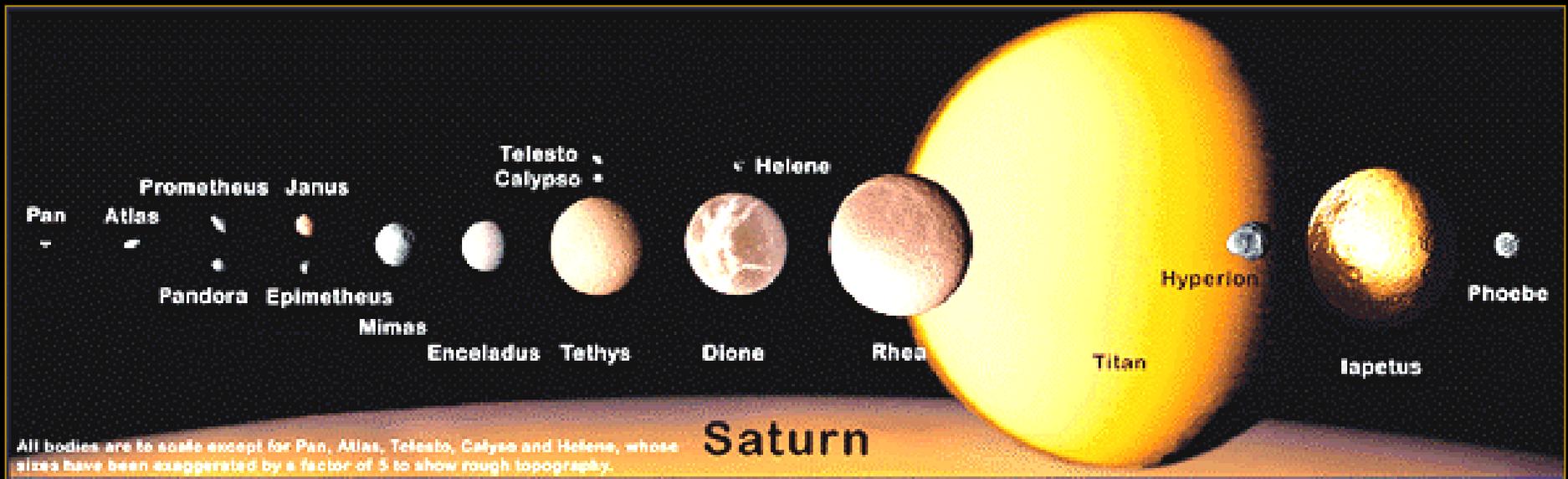
\*The Encke gap lies within the A ring.

Astronomy Today, Chaisson & McMillan

Saturno:

limite é  
144.000  
km do  
centro,  
atinge  
todos os  
anéis,  
exceto o E

# Anéis e alguns satélites de Saturno



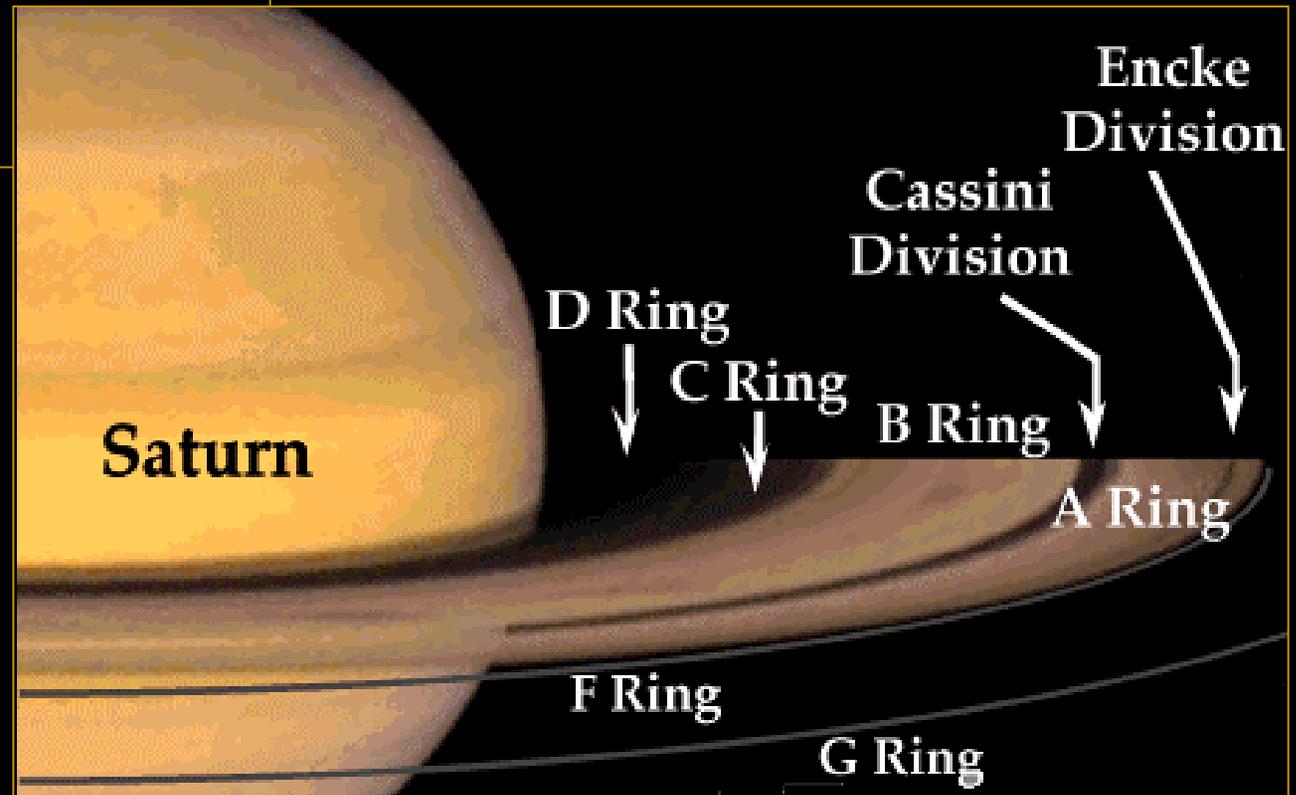


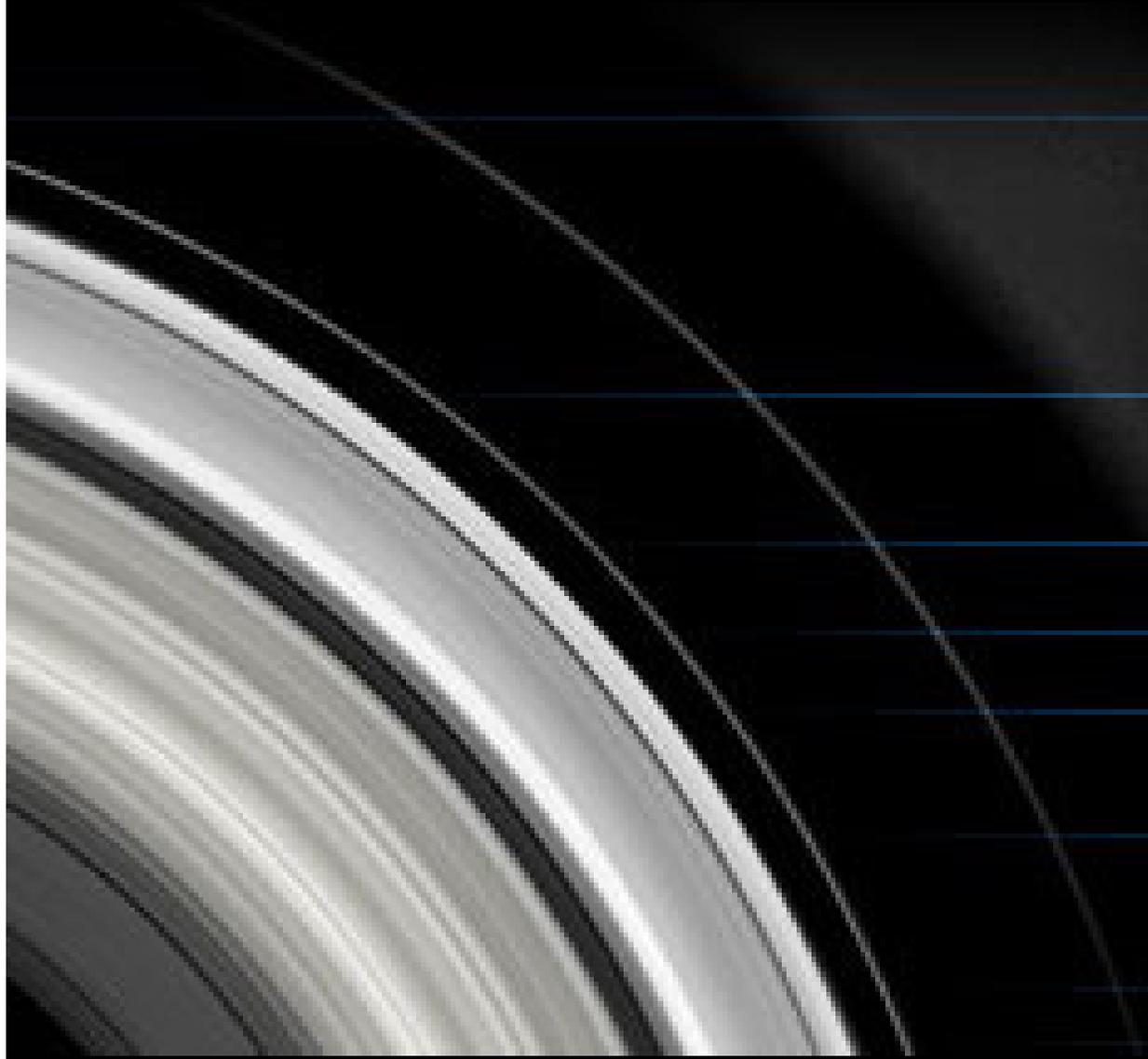
## Voyagers:

- descobrem os anéis D e E
- Anél E parece ter sido formado com material ejetado por vulcanismo de Encelado

## Satélite Mimas

- interfere nas órbitas dos anéis da divisão de Cassini; ressonância 2:1
- no anél A: parte externa é influenciada pelo satélite Atlas; ele impede a difusão do anel. ressonância 3:2





E Ring

G Ring

F Ring

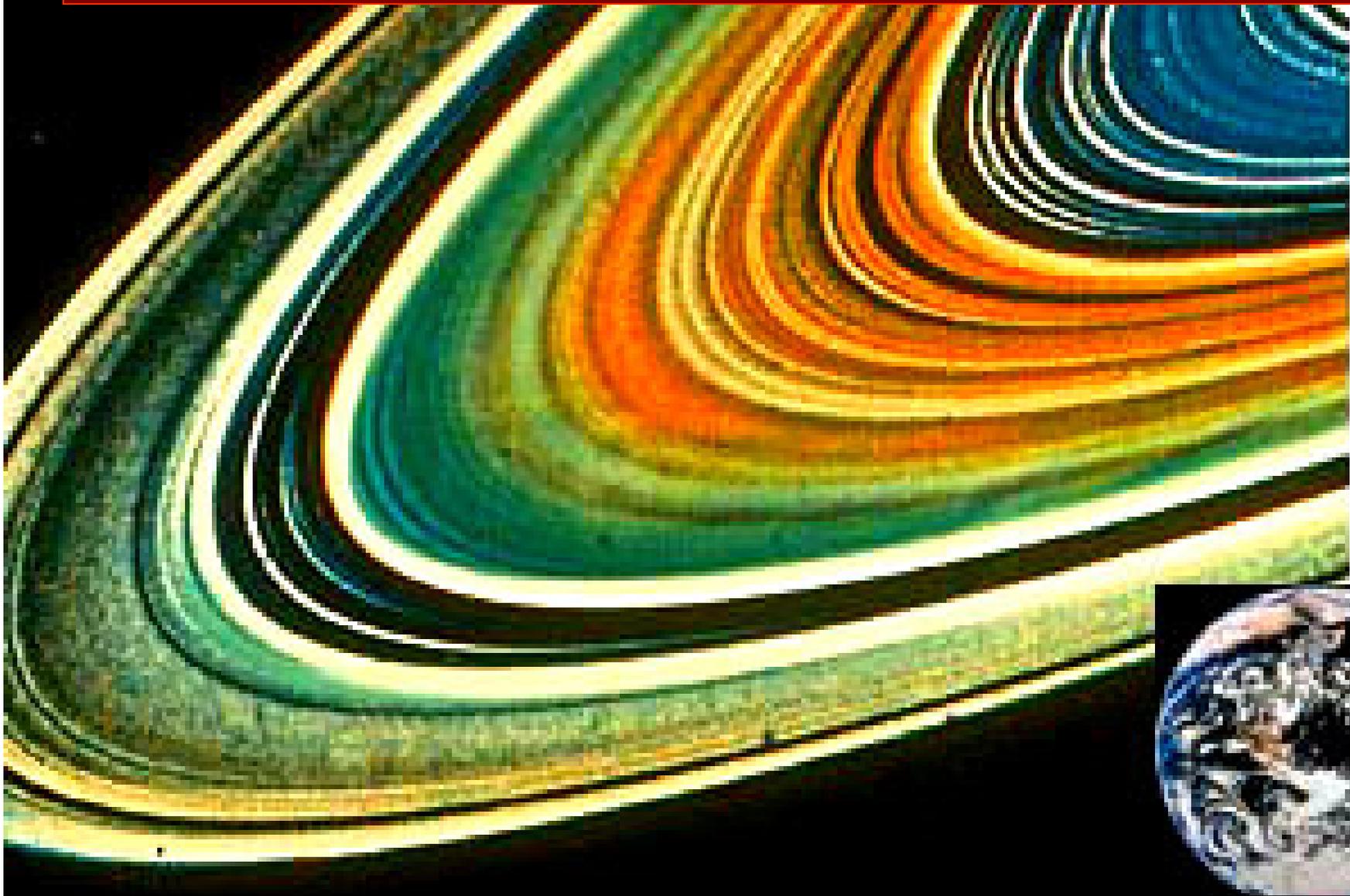
A Ring

Cassini Division

B Ring

C Ring

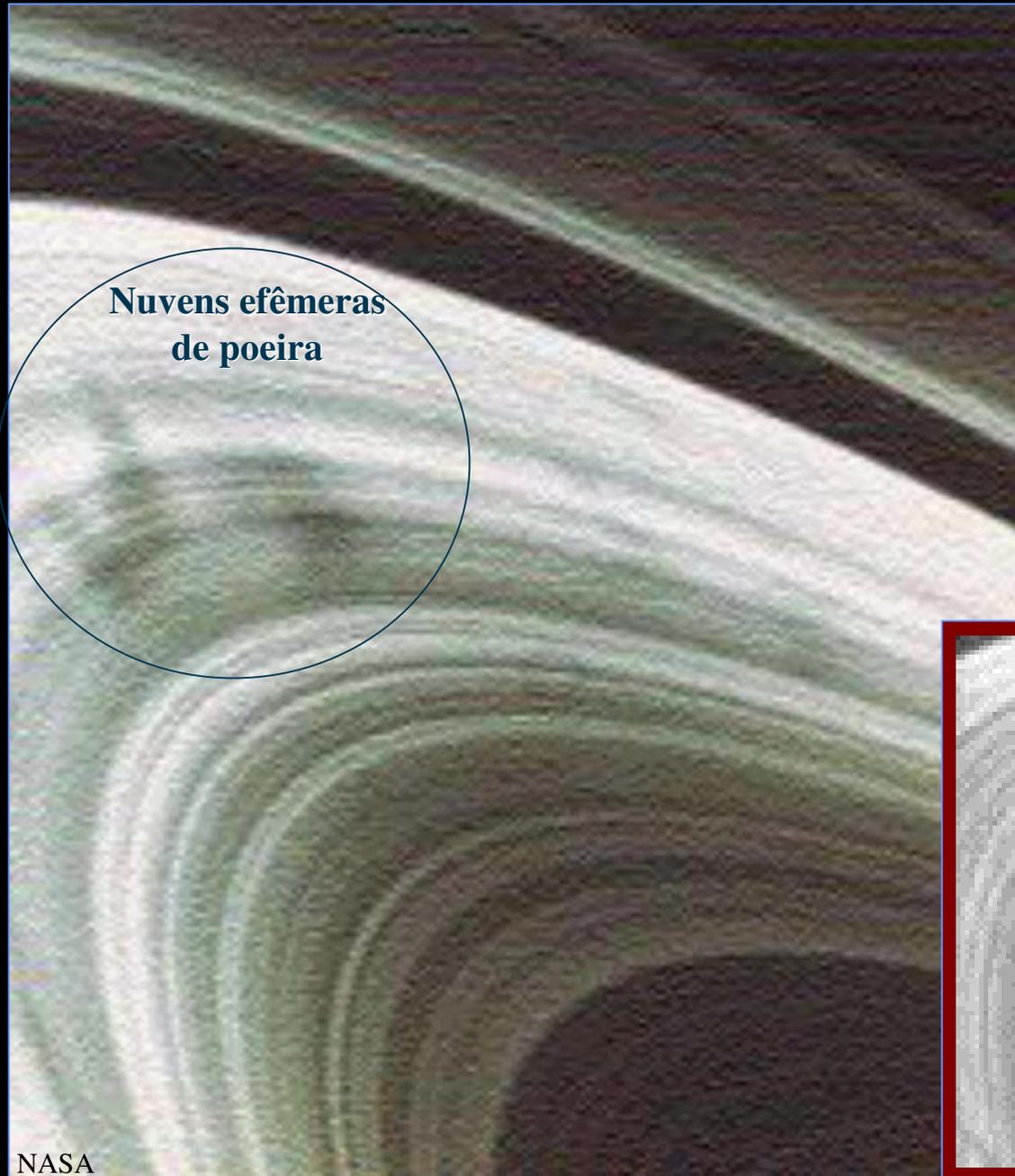
D Ring



Os anéis não contínuos, mas compostos de inúmeros outros mais finos.

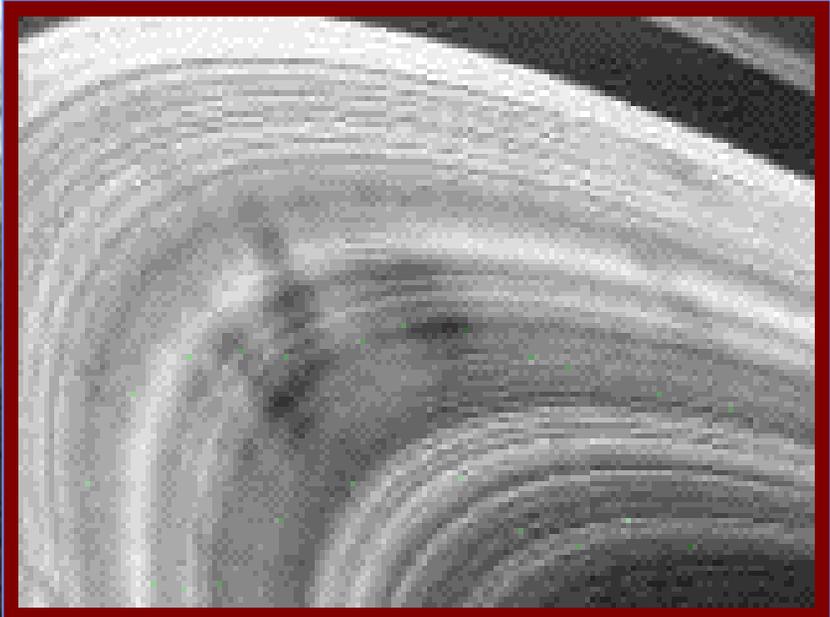
Mesmo as regiões de falhas não são vazias.

As cores são falsas, e o tamanho relativo da Terra é mostrado.



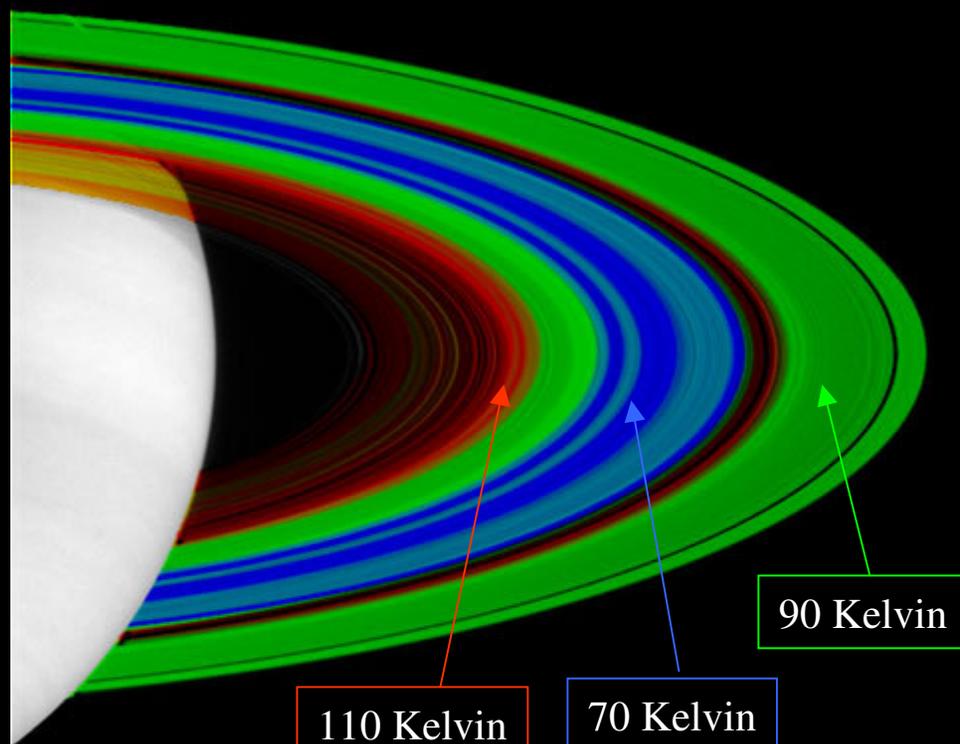
Nuvens efêmeras de poeira

- Antes da chegada da Voyager, pensava-se que as colisões entre as partículas mantinham os anéis uniformes. A Voyager registrou estruturas efêmeras na direção radial.
- Acredita-se que as forças gravitacionais isoladamente não explicam.
- É possível que a repulsão eletrostática entre as partículas dos anéis atuem de alguma forma.



# Distribuição de temperatura

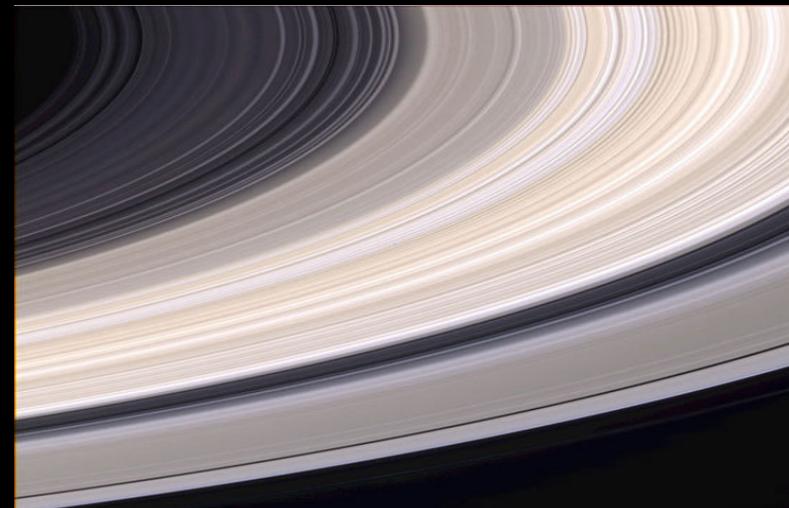
# Saturno



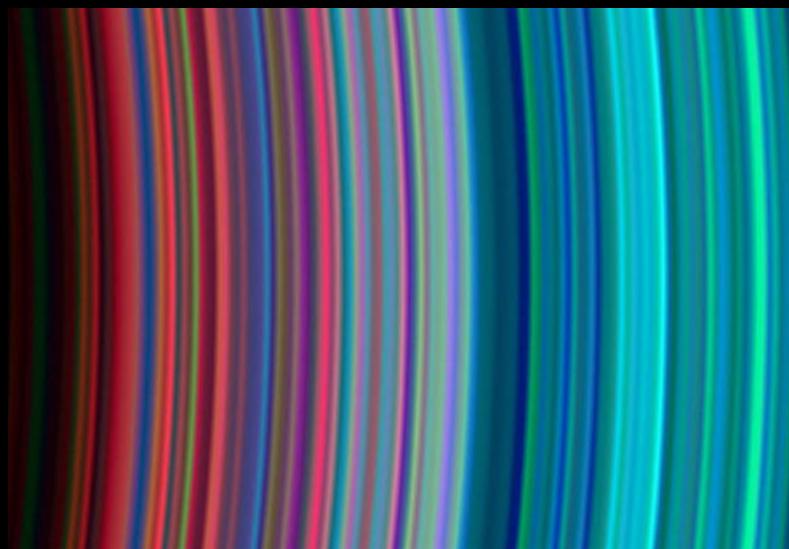
110 Kelvin

70 Kelvin

90 Kelvin



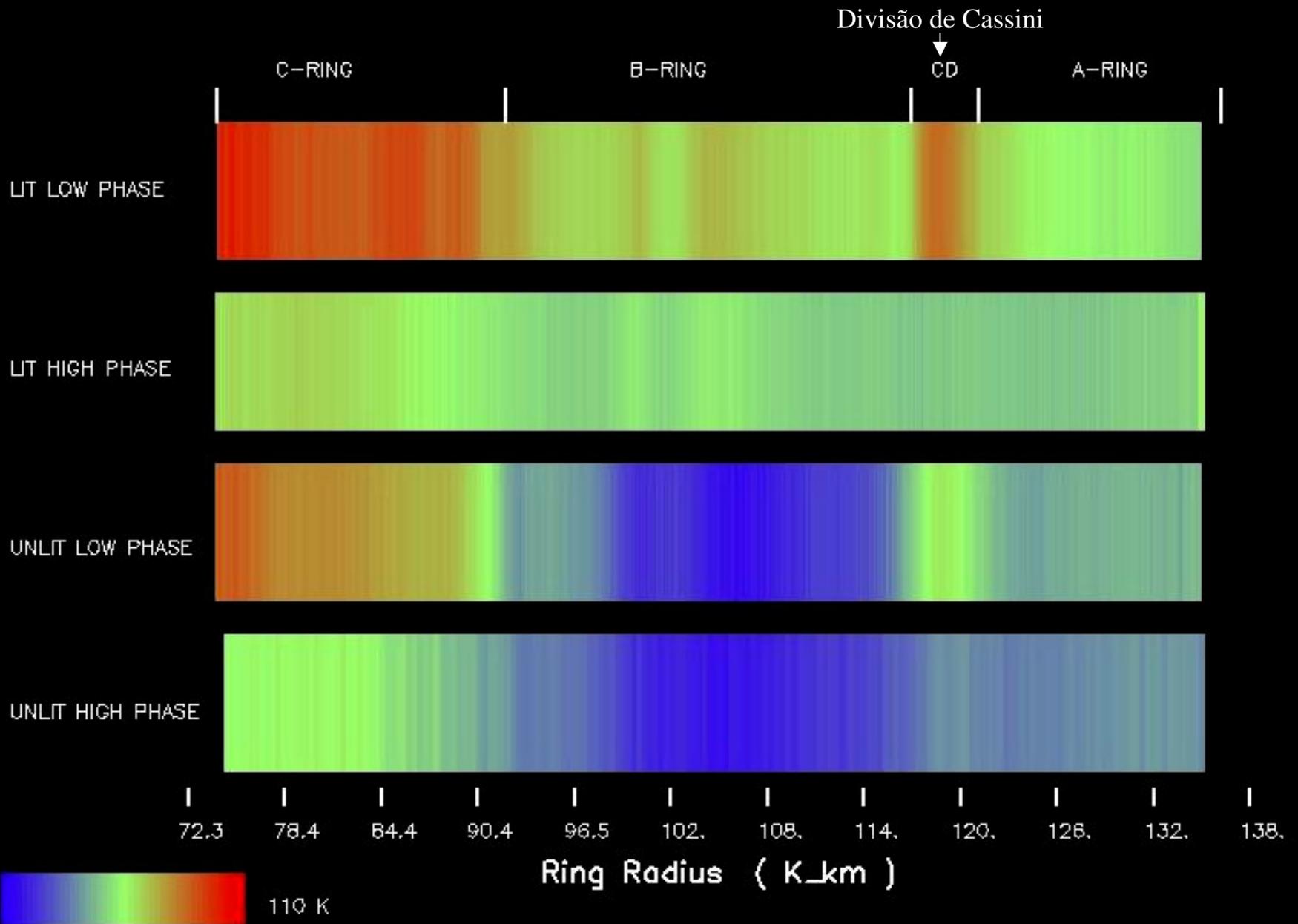
Gelo de água reflete cor clara  
Cores mais escuras: contaminação

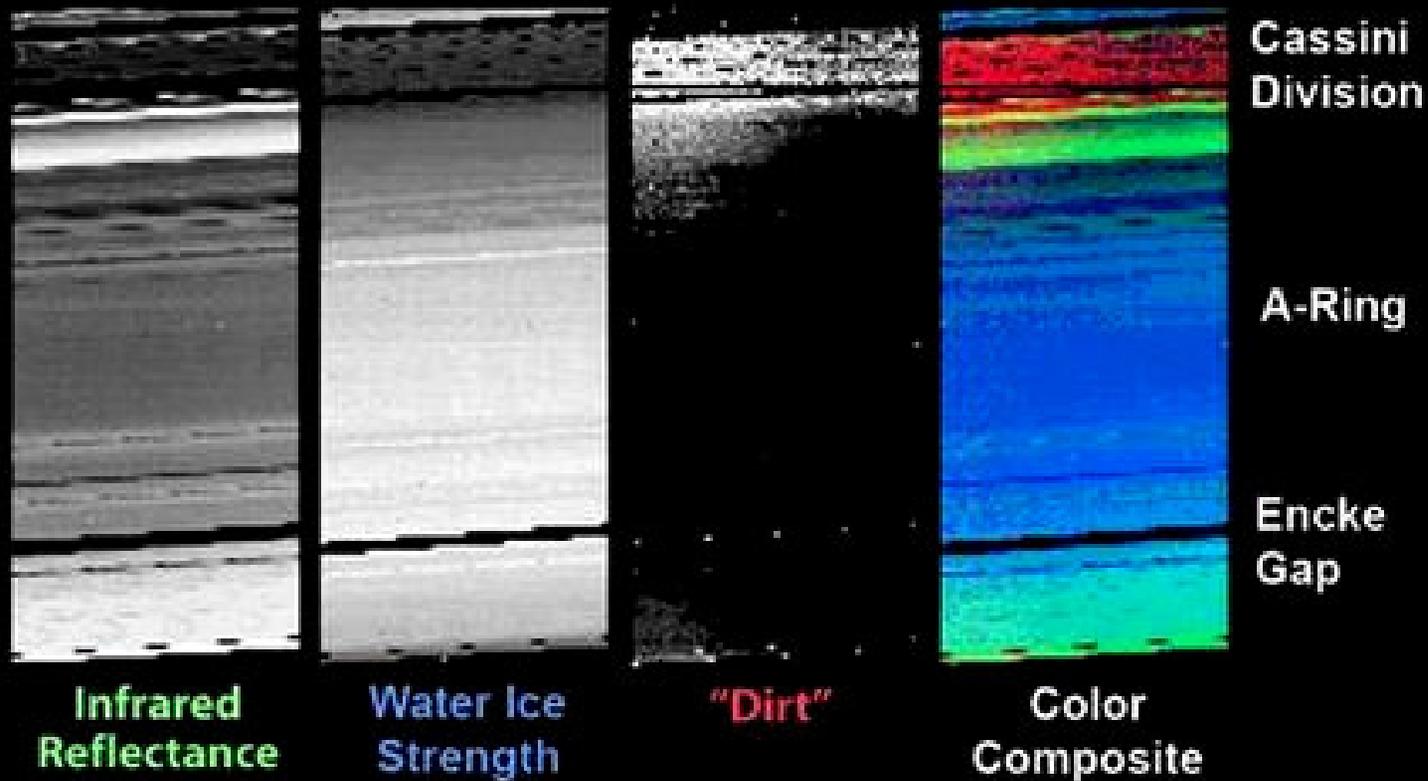


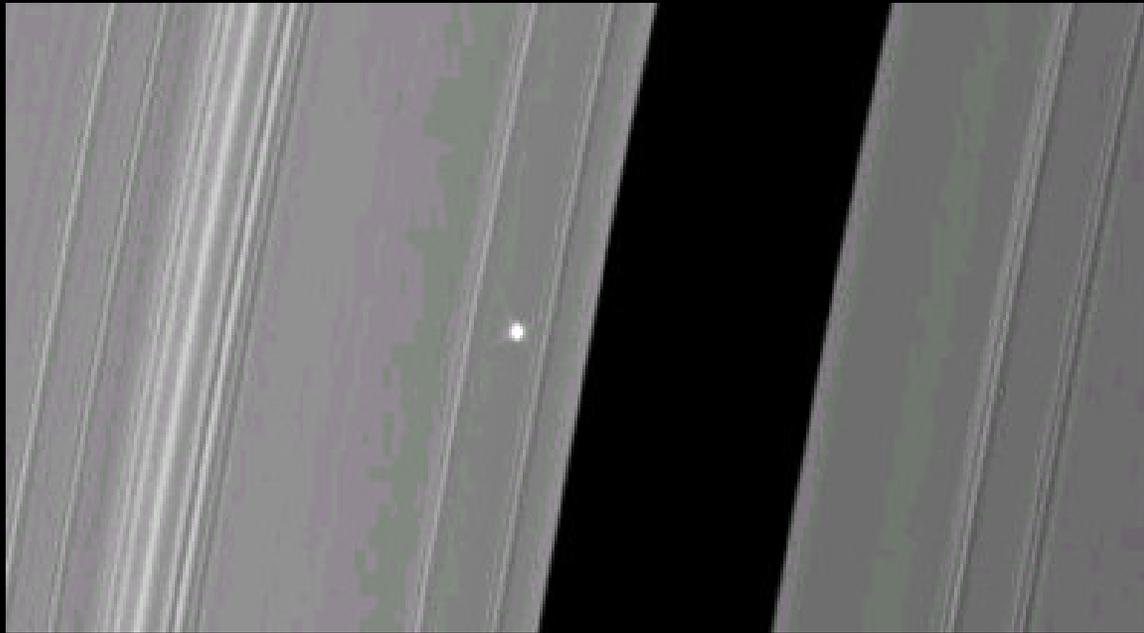
Sólidos mais “empoeirados”: cor avermelhada  
Sólidos congelados mais limpos: cor turquesa

# Distribuição de temperatura

# Saturno







Cassini/NASA  
(9/set/2006)

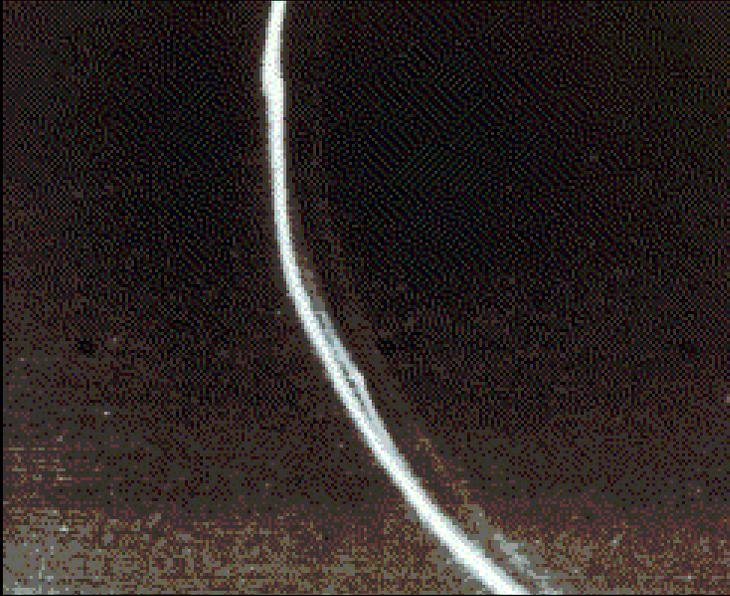
A gigante vermelha Aldebaran é vista através dos anéis. A ocultação da estrela pelos anéis provoca flutuação de brilho que é proporcional à abundância de partículas local.

A lacuna de Encke tem 325 km de largura.

A imagem foi tirada a 359.000 km de distância de Saturno

# Anel F

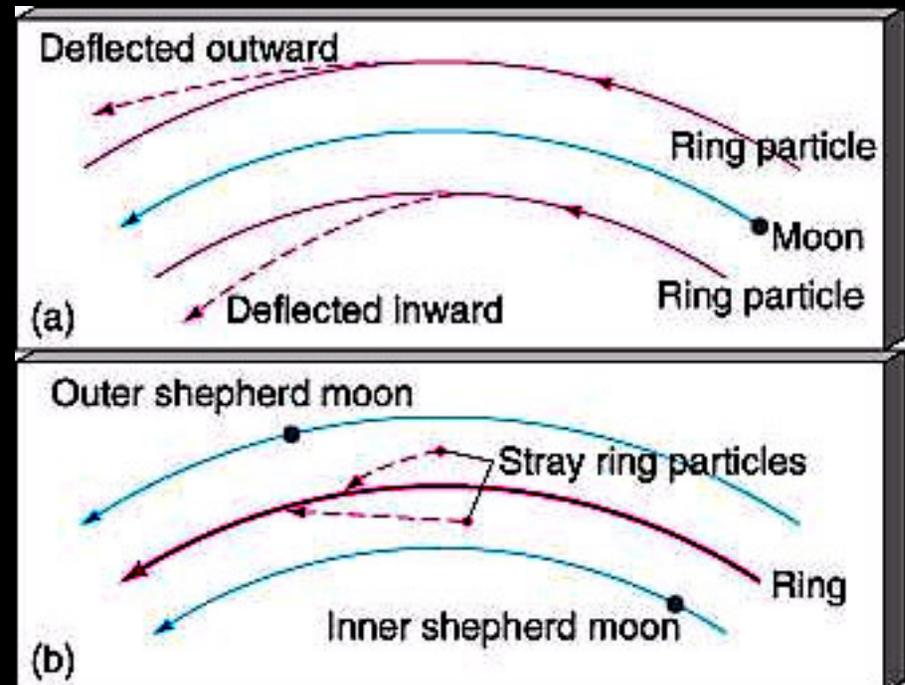
# Saturno

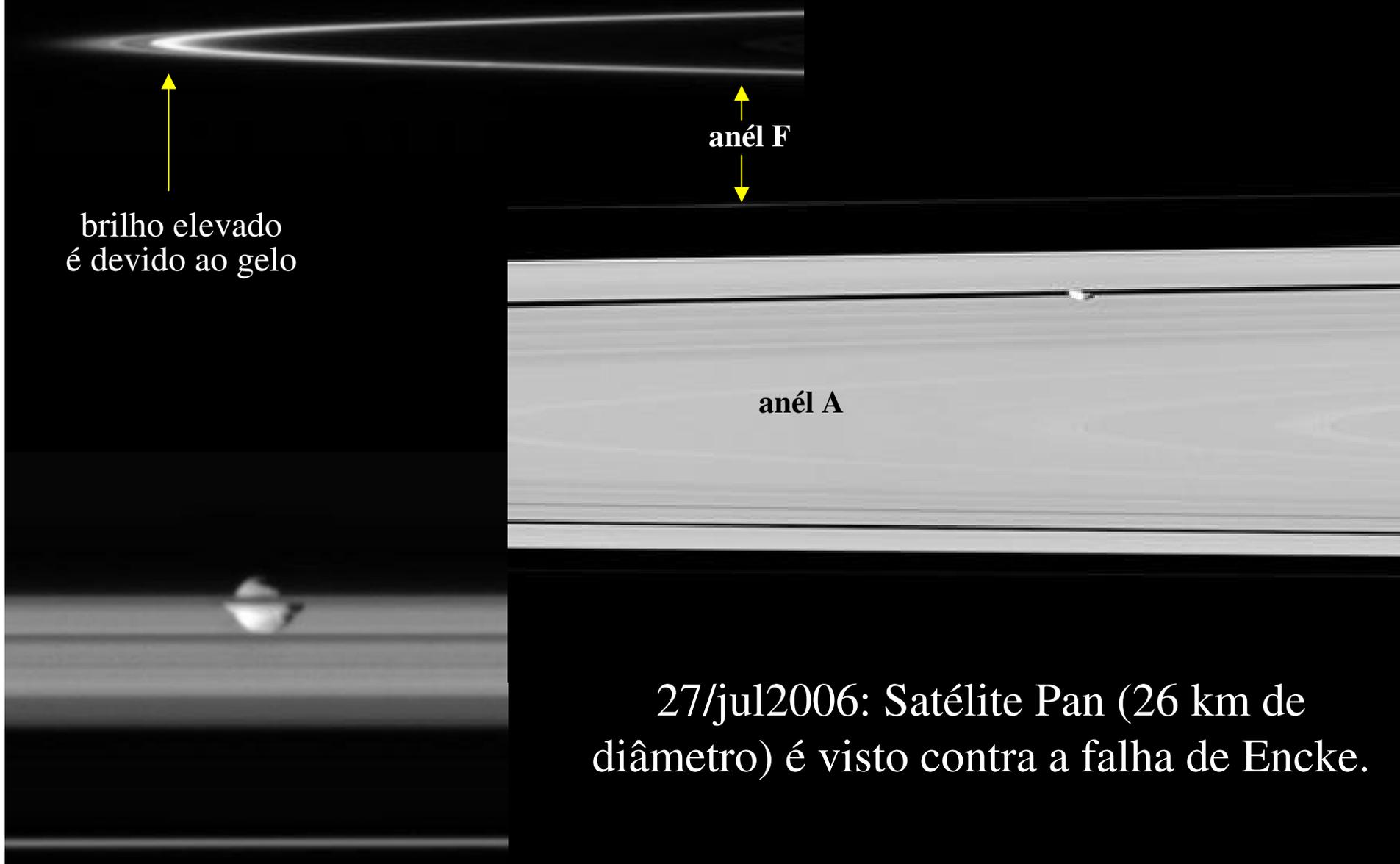


- fica no interior do Limite de Roche
- sua aparência decorre da ação dos satélites Prometeu e Pandora:- diâmetros ~50 km
  - situados a 1.000 km da cada lado do anel

Satélite entre anéis:  
provoca a expulsão das  
partículas

Anel entre satélites: efeitos combinados  
empurram partículas para o anel;  
por isso são denominados “satélites pastores”





27/jul2006: Satélite Pan (26 km de diâmetro) é visto contra a falha de Encke.

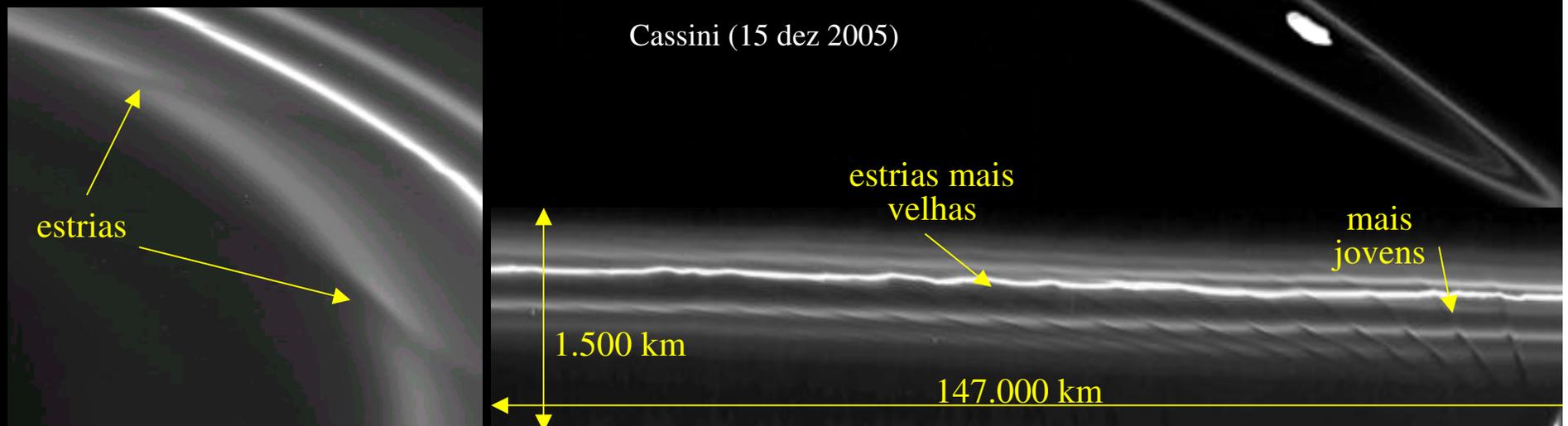
## Anel F

## Saturno

Prometeus (102 km) e Pandora (84 km) rodeando o anel F, atuam como pastores e o moldam.

Efeito causado por Prometeus, decorrente de seu afastamento e aproximação do anel, a cada 14,7 horas.

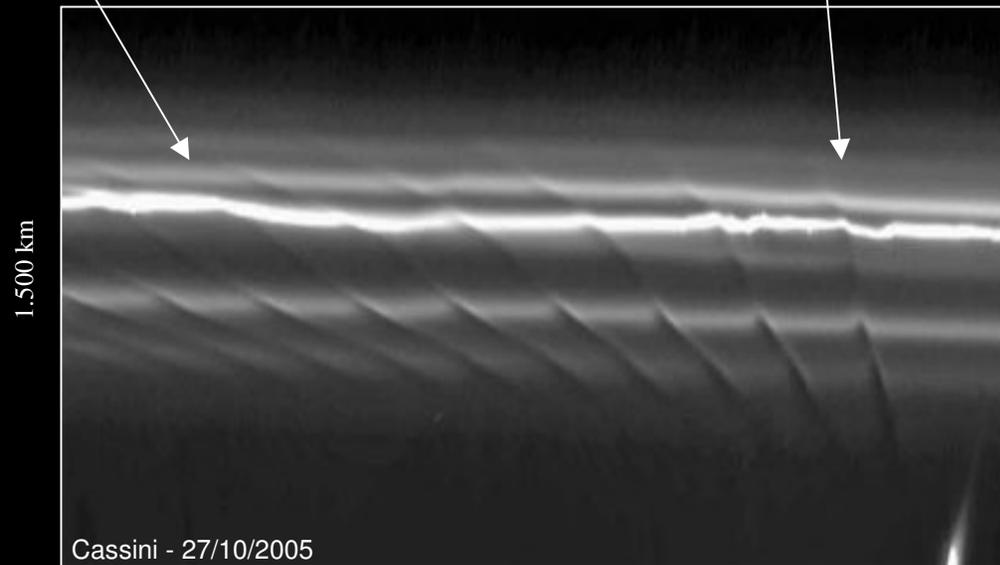
As inclinações das estrias se devem a aproximação de Prometeus: quando próximo as partículas movem-se mais lentamente que o satélite do que quando esta está mais distante.



## Ondulações causadas no anel F pela por Prometeu

estrias mais velhas

estrias mais jovens

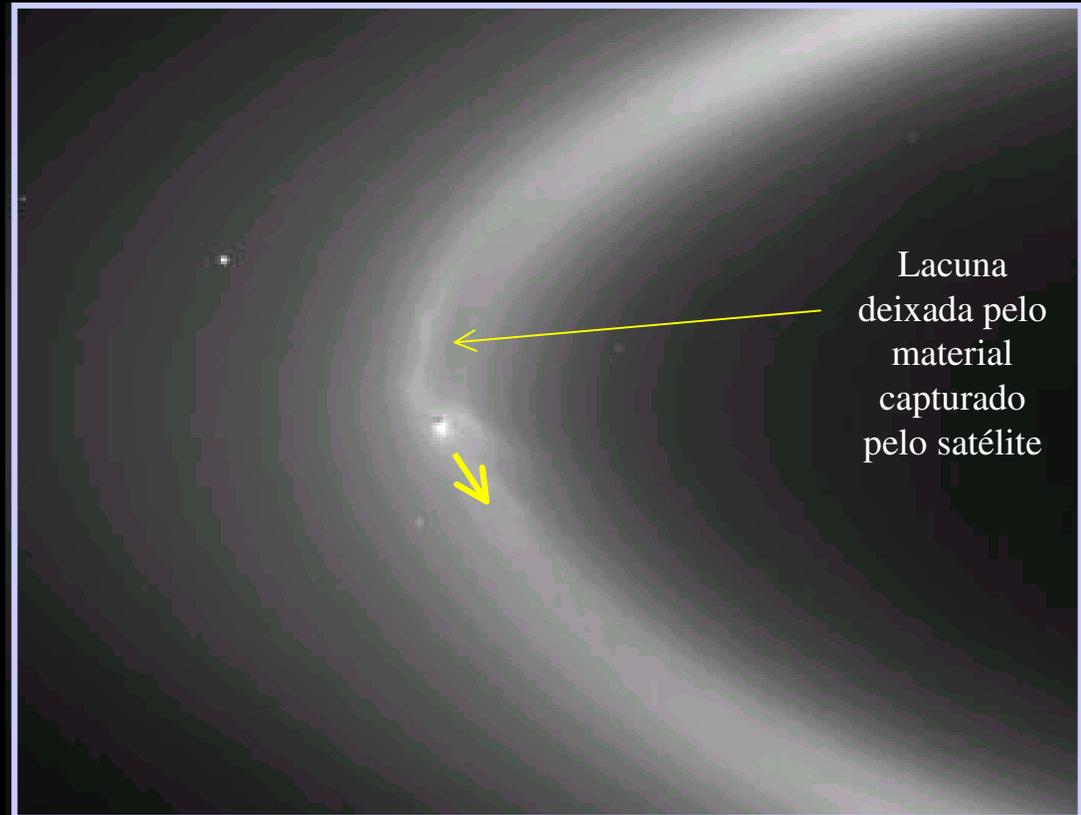


147.00 km

As partículas mais próximas do satélite movem-se mais devagar (atração) que as demais criando esse efeito. Como o anel F é excêntrico a distância entre ele e Prometeu varia, assim como este efeito. A aproximação máxima deve ocorrer em dezembro/2009.

Material congelado (gêisers) ejetado do pólo sul de Encélado alcança milhares de km e alimenta o anel E.

O ângulo Sol-Encélado-Cassini de 175 graus, cria uma geometria que propicia alto brilho das partículas.



O material ejetado na direção do movimento do satélite adquire órbitas maiores e mais lentas e seguem Encélado em sua órbita (sentido anti-horário); material ejetado na direção oposta adquire órbitas menores e mais ligeiras, seguindo o satélite.

A cor azulada do anel E



Imagens combinadas dos telescópios Hubble e Keck.

O cenário provável: impactos de meteoróides na superfície de Encélado espalha detritos de tamanhos variados na órbita do satélite. Os detritos maiores permanecem na órbita do satélite e podem ser varridos por ele. As partículas menores ficam sujeitas a forças sutís que as arrastam em direção ao planeta, ou em direção oposta.

Essas forças incluem pressão da radiação solar, torques magnéticos atuando sobre as partículas eletricamente carregadas, além de variações gravitacionais pelo bolo equatorial de Saturno.

O resultado final é a formação de um anel largo composto de partículas sub-micrométricas que espalham predominantemente luz azul.



A disposição geométrica especial permitiu que a sonda Cassini, protegida da iluminação solar, revelasse os anéis como jamais se vira antes. Anéis fraquíssimos até então desconhecidos foram revelados.

NASA/JPL/Space Science 11/out/2006

*Onde há fumaça, há fogo. Em Saturno, onde há anel novo, deve haver uma lua (Jeff Cuzzi, NASA)*

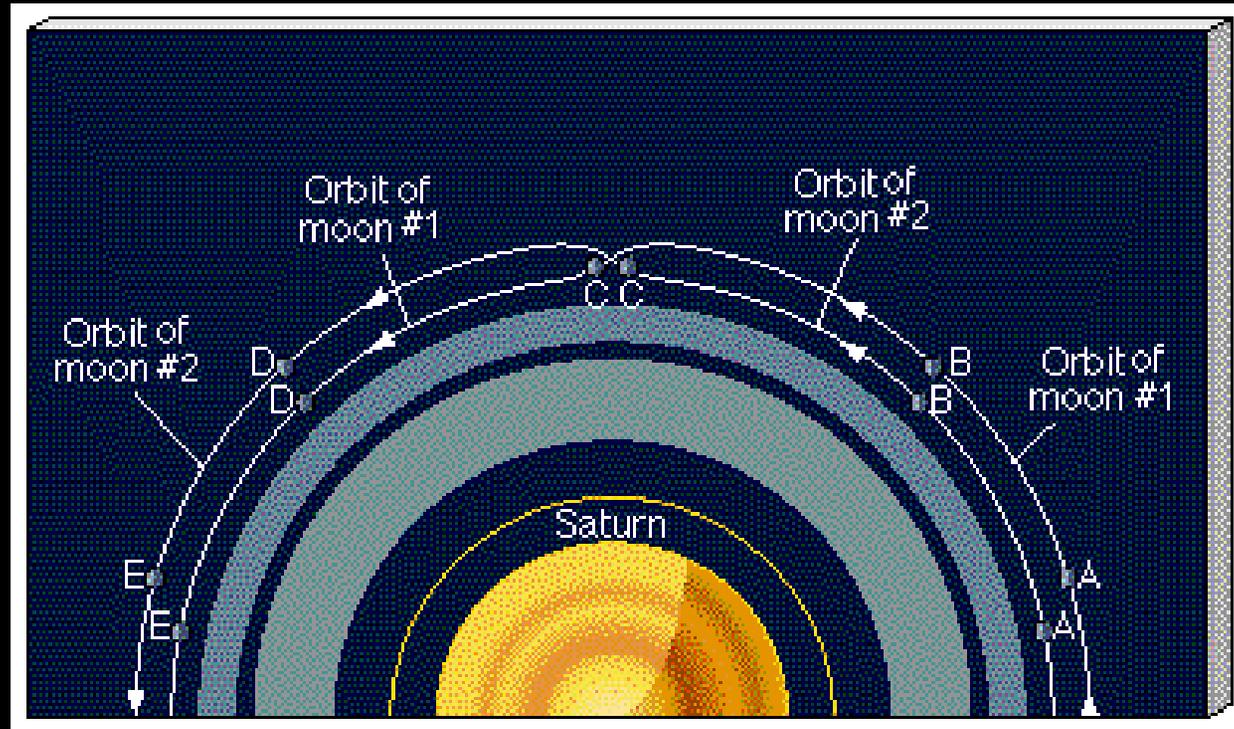
Nessas condições de alto contraste, partículas microscópicas podem ser reveladas.

Novo anel simples, de baixíssimo brilho, pode ser revelado nas órbitas dos dois satélites pequenos Janus e Epimeteus.

Um segundo anel muito fino foi descoberto na órbita do pequenino Pallene, satélite descoberto em 2004.

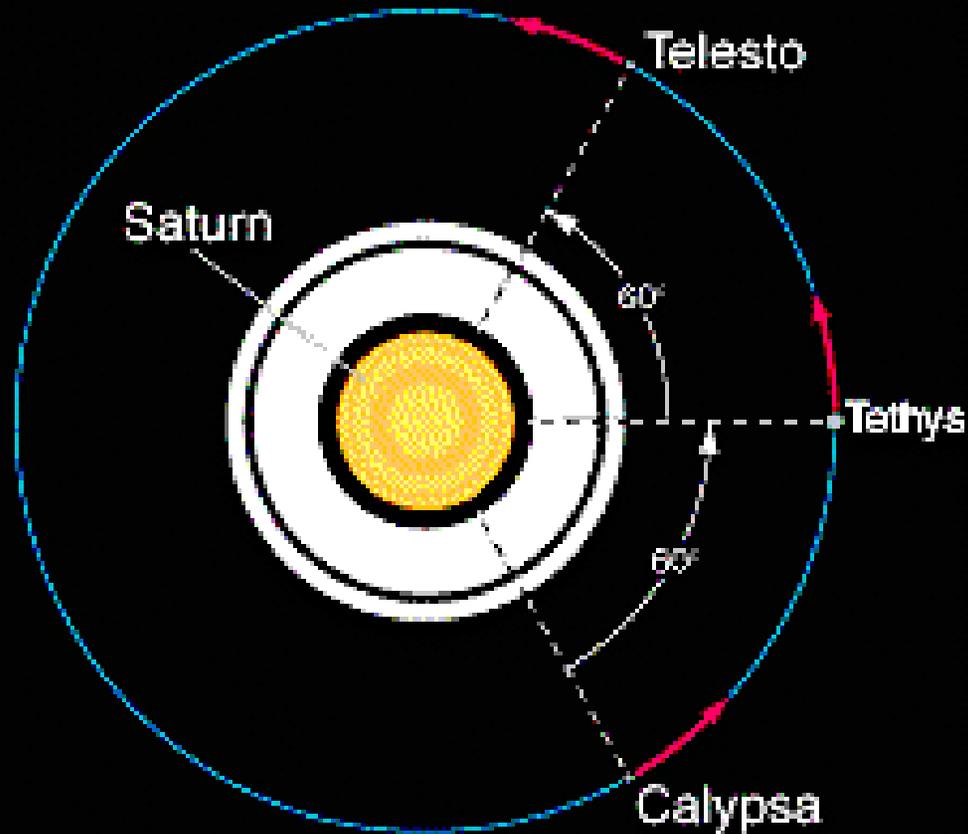
Ainda, descobriu-se dois anéis na Divisão de Cassini que não foram vistos pela Voyager.

A gravidade dos pequenos satélites não é suficiente para reter material solto em suas superfícies. Quando atingidos por meteoróides interplanetários, esse material superficial é ejetado e criam anéis ao longo do trajeto dos satélites. Colisões entre esses pequeninos satélites, ou entre blocos rochosos de dimensões métricas, também produzem detritos. O anel G, por exemplo, parece não possuir mini-satélites, o que nos leva a concluir que ele foi formado recentemente por destruição de algum corpo que lá existia.



Esse movimento peculiar é contínuo;  
no ponto C eles alternam as órbitas

Efeito combinado de Saturno e Tetis sobre Telesto e Calypso



Pontos de Lagrange para ressonância 1:1

## Hipóteses:

1. Estimativa da massa chega a  $10^{15}$  toneladas → Seria um satélite com diâmetro ~250 km, dentro do limite de Roche, que se desintegrou? Colisões posteriores pulverizaram os fragmentos?
2. Resquício de material primitivo que não formou satélite, porque estava no interior do limite de Roche?

## Evidências:

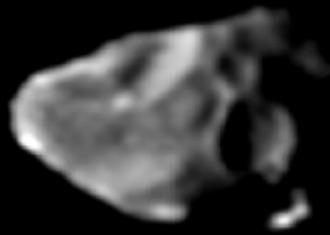
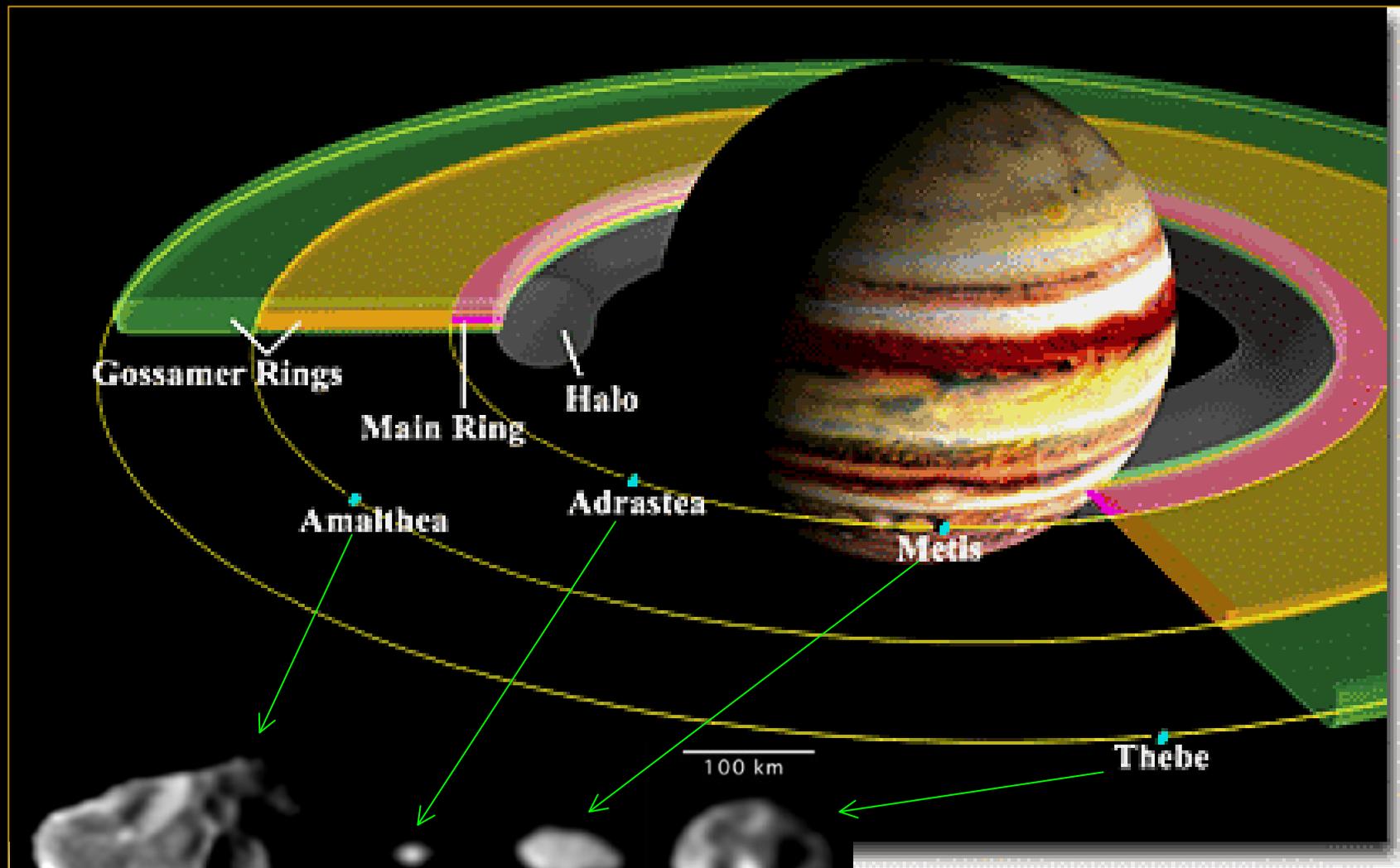
- os anéis são bem mais (~100 vezes) novos que o Sistema Solar
- não haveria estabilidade para manter os anéis por 4,6 bilhões de anos

## Conclusões possíveis:

- a) seriam formados de material expelido dos satélites por meio de choque de meteoróides, ou
- b) evento catastrófico (colisão com outro satélite ou cometa) desintegrou um ou mais satélites

# Anéis de Júpiter

Bem mais finos e compostos de poeira meteorítica



Amalthea



Adrastea



Metis



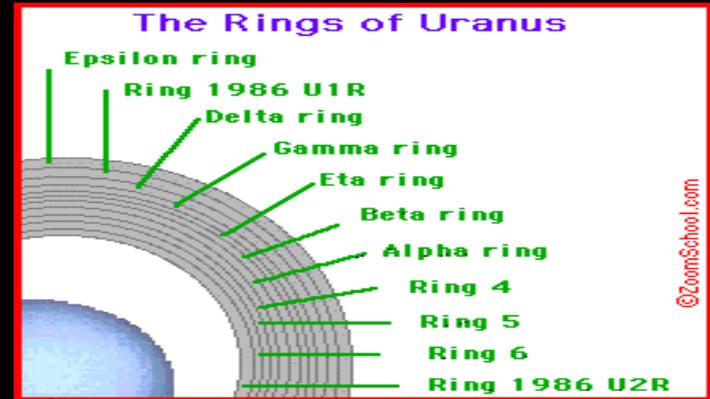
Thebe

100 km

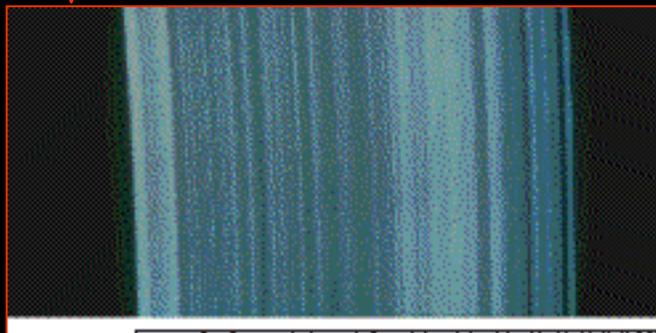
# Anéis de Urano – os principais

RING	INNER RADIUS	OUTER RADIUS*	WIDTH		
	(km)	(planet radii)	(km)	(planet radii)	(km)
1986U2R	37,000	1.45	39,500	1.55	2500
6	41,800	1.64			2
5	42,200	1.65			2
4	42,600	1.67			3
Alpha	44,700	1.75			4—10
Beta	45,700	1.79			5—11
Eta	47,200	1.83			2
Gamma	47,600	1.86			1—4
Delta	48,300	1.90			3—7
1986U1R	50,000	1.96			2
Epsilon	51,200	2.00			20—100

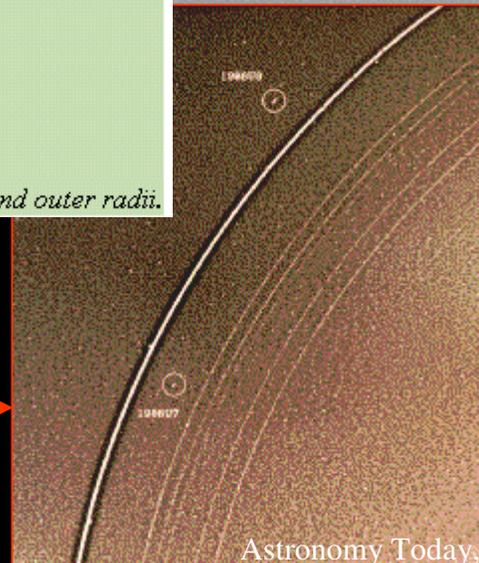
\*Most of Uranus's rings are so thin that there is little difference between their inner and outer radii.



@ZoomSchool.com



Cordélia e Ofélia atuam para a estabilidade do anél Epsilon



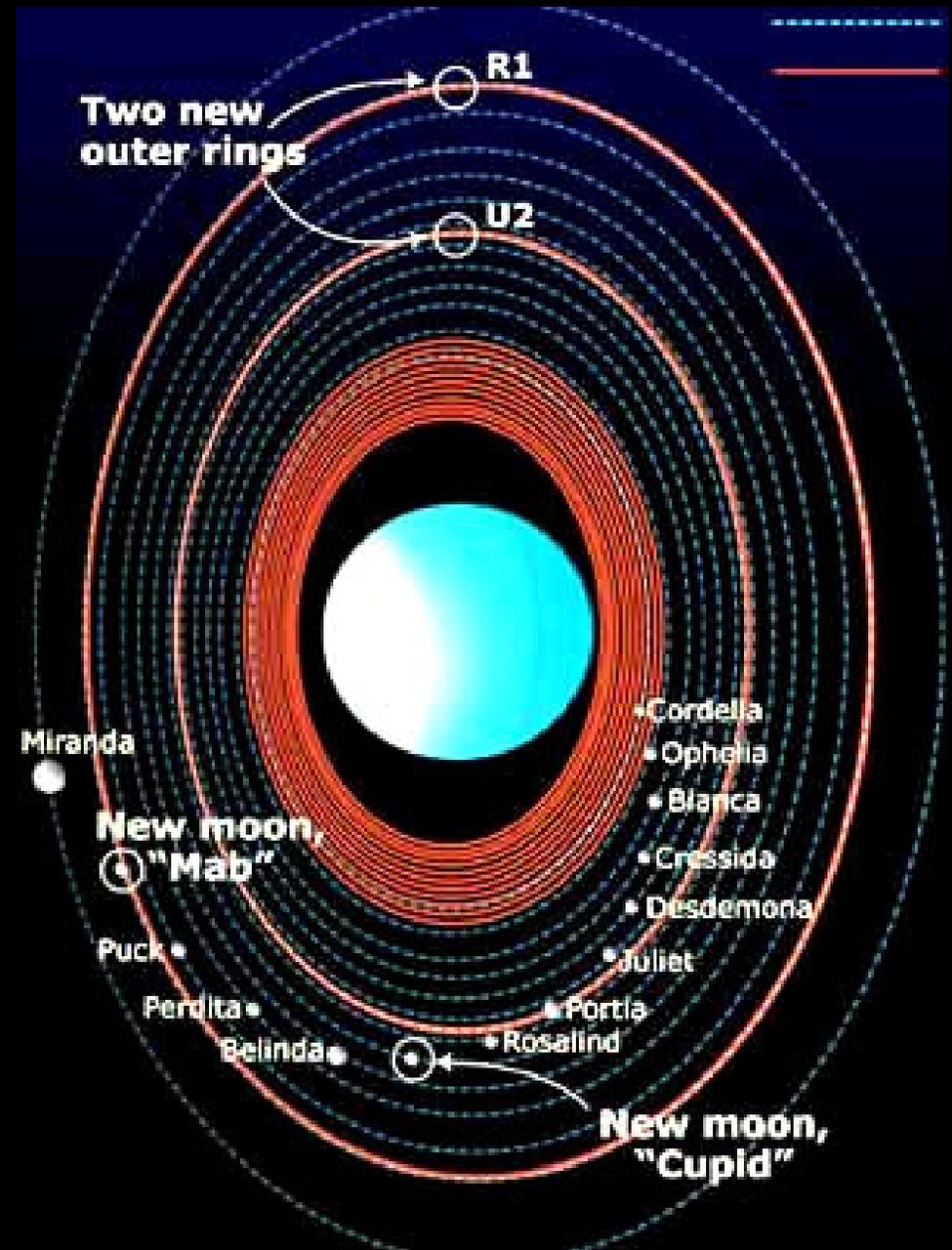
Poeira: densidade semelhante a dos anéis A e B de Saturno; mais escuros; menores que 1 cm

## Anéis de Urano

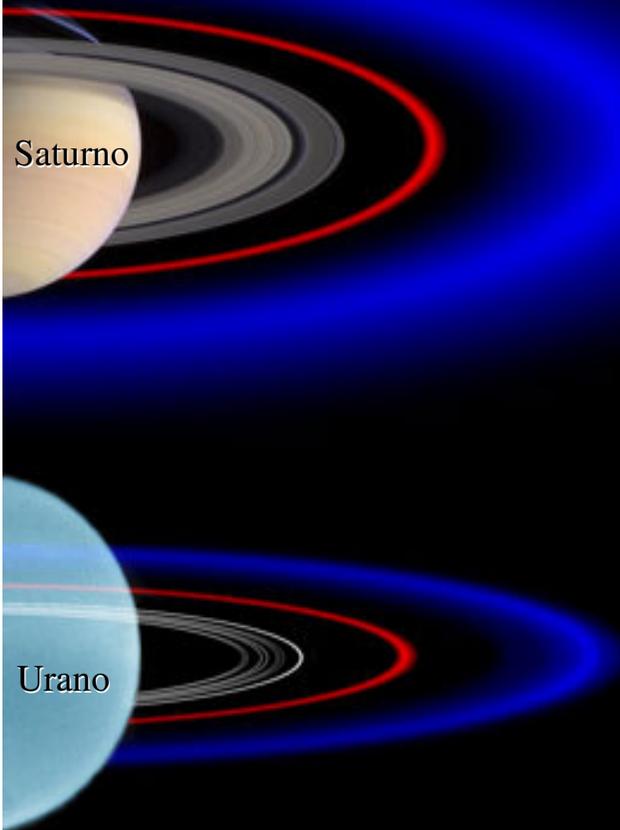
São 13 anéis: 11 conhecidos há mais de 20 anos e 2 descobertos em 2005.

É possível que o anel externo deva ser formado por partículas do satélite Mab, descoberto em 2003.

A erosão provocada por colisão com meteoróides lança poeira e pequenas rochas ao espaço, que acabam na órbita do planeta.



## Anéis de Urano



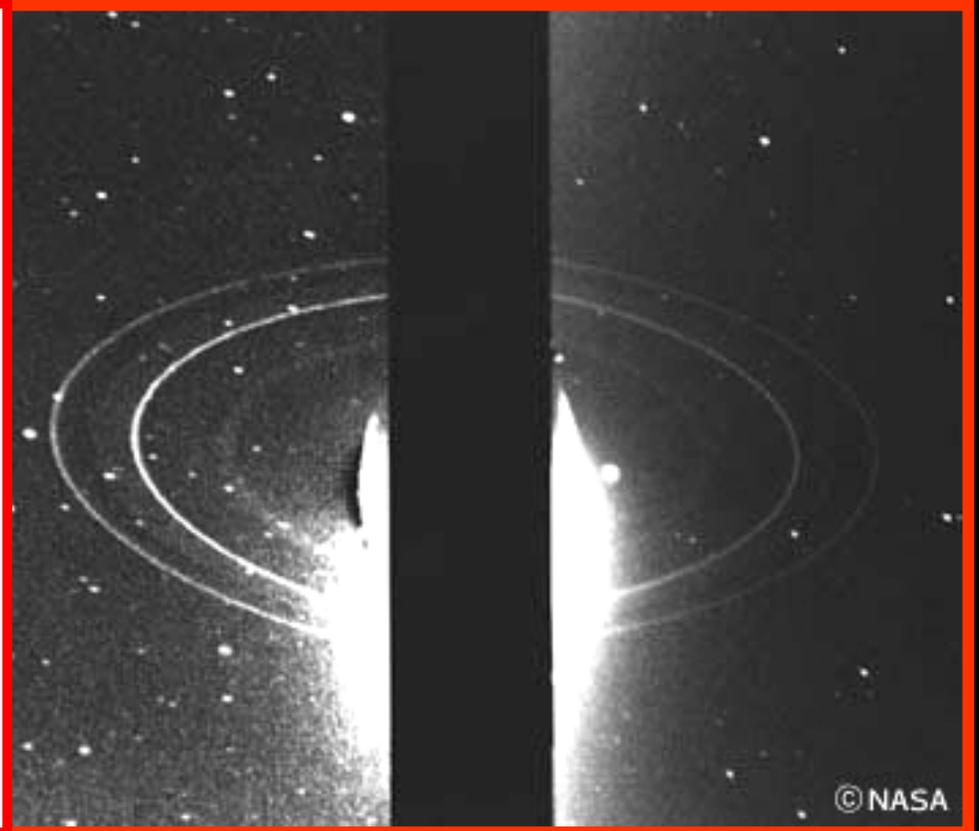
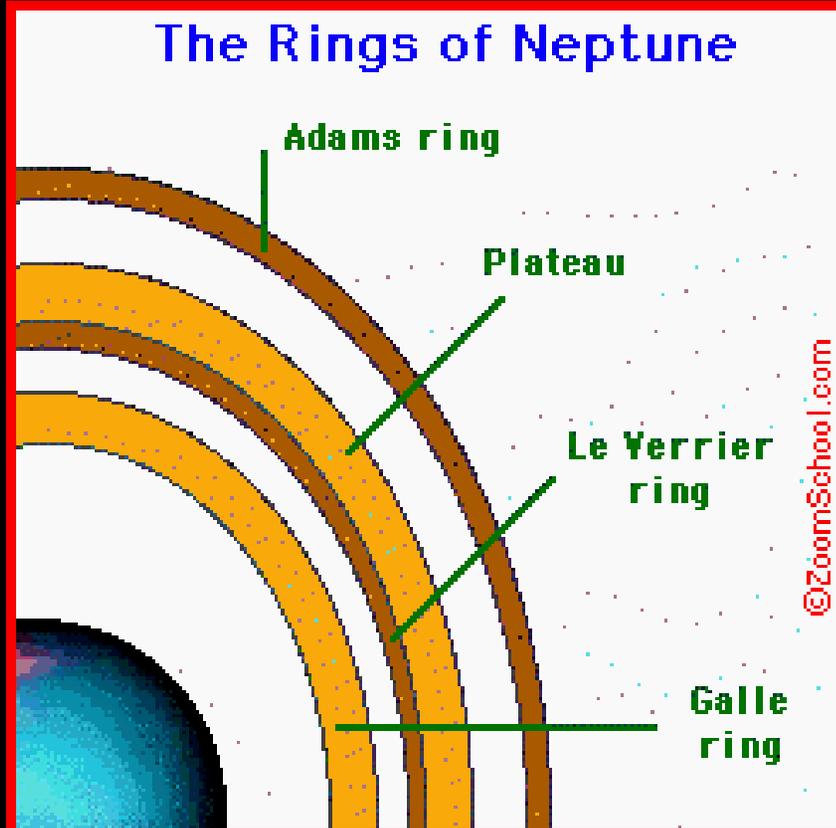
A combinação de imagens no visível e no infravermelho revelaram novo anel azulado, composto de partículas sub-micrométricas que espalham com maior intensidade luz de cor azul. Os anéis avermelhados são formados por partículas bem maiores, que espalham melhor luz de cor vermelha.

Provavelmente esse anéis estão associados a pequenos satélites.

A anel mais externo de Saturno o anel está associado a Encélado. O de Urano, está associado ao satélite Mab.

Comparação entre anéis azulados de Saturno e Urano (Pater, Hammel, Gibbard, and Showalter). Imagens dos telescópios Hubble e Keck.

# Anéis de Netuno



Os mais densos

# Anéis dos quatro planetas gigantes

