

# 4. TEORIA DI ROCHE E PROCESSI DINAMICI



# Il limite di Roche

- Gli anelli planetari sono costituiti da una miriade di piccole particelle orbitanti all'interno del limite di Roche.
- Il limite di Roche corrisponde alla minima distanza dal pianeta per cui un oggetto (satellite) viene disgregato dalle forze mareali generate dal campo gravitazionale del pianeta.
- A questa distanza le forze mareali sono bilanciate dall'autogravità dell'oggetto (Weidenschilling et al., 1984).
- Oggetti solidi non possono accrescere se si trovano all'interno del limite di Roche.

# Ipotesi

- Sistema a due corpi: Pianeta-Satellite;
- Problema stazionario nel sistema rotante: satellite su orbita circolare, periodo orbitale uguale al periodo rotazionale, obliquità nulla;
- Satellite di forma sferica, pianeta puntiforme;
- Il satellite è mantenuto dalle sole forze gravitazionali.

In condizioni stazionarie le uniche forze agenti su una massa unitaria in orbita attorno al pianeta sono la gravità e la forza centrifuga ( $n$  velocità angolare):

$$n^2 r \hat{r} - \frac{GM_p \hat{r}}{r^2} = 0$$

Terza legge di Keplero per orbite circolari:

$$n^2 = \frac{GM_p}{r^3}$$

Forza mareale effettiva:

$$\frac{d\bar{g}_{eff}}{dr} = \frac{3GM_p}{a^3} \hat{r}$$

La condizione di bilanciamento tra autogravità del satellite (S) e forza mareale del pianeta (P):

$$\frac{GM_S}{R_S^2} = \frac{3GM_p R_S}{a^3}$$

avviene alla distanza planetocentrica:

$$\frac{a}{R_p} = 1.44 \left( \frac{\rho_p}{\rho_S} \right)^{0.33}$$

# Correzioni di Roche:

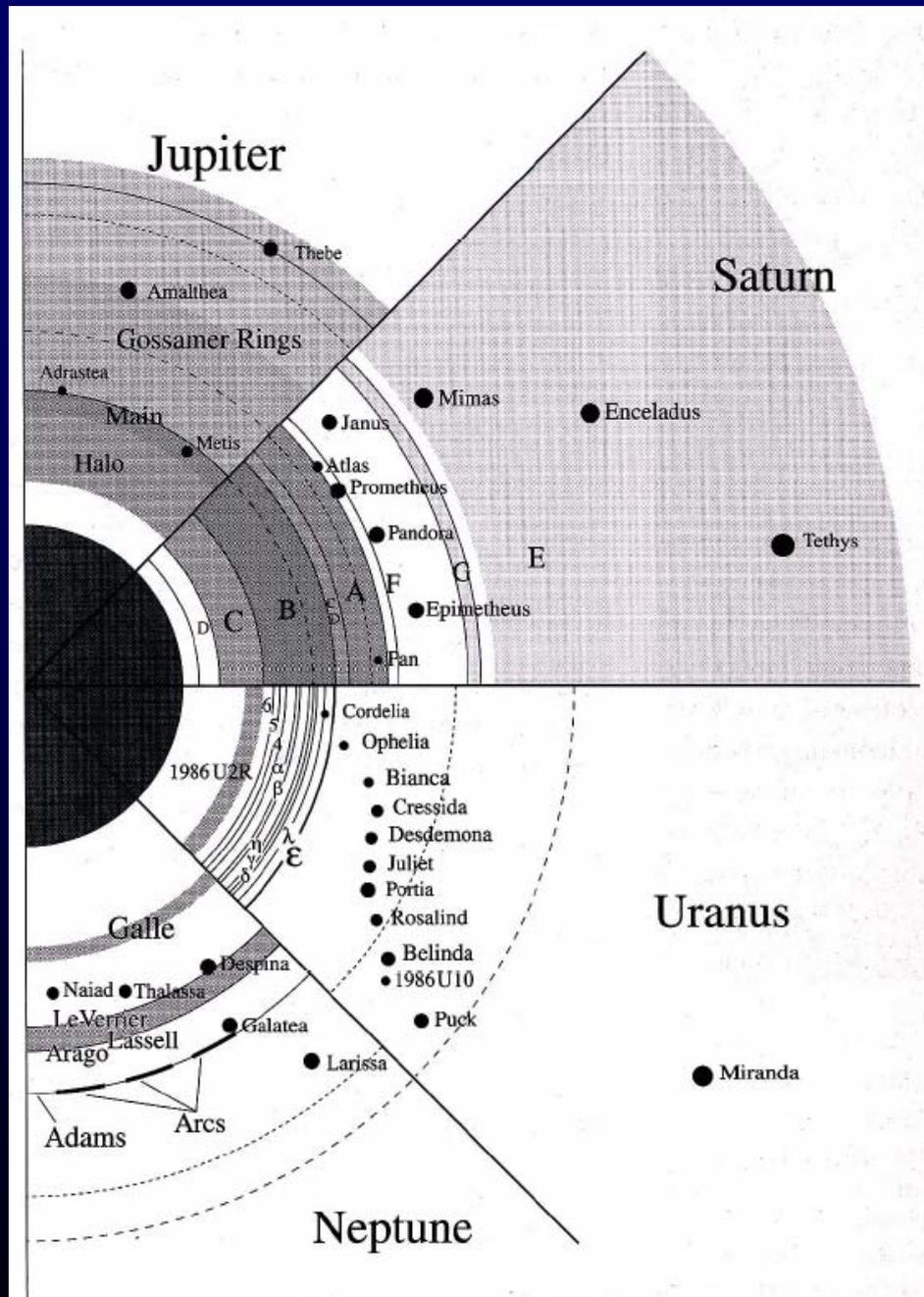
- Eccentricità dell'orbita del satellite;
- Forma oblata del pianeta;
- Forma oblata del satellite (aumento della forza mareale e diminuzione dell'autogravità);
- Limite di Roche per un satellite “liquido”, completamente deformabile:

$$\frac{a_{ROCHE}}{R_P} = 2.456 \left( \frac{\rho_P}{\rho_S} \right)^{0.33}$$

# Distribuzione degli anelli per i pianeti giganti

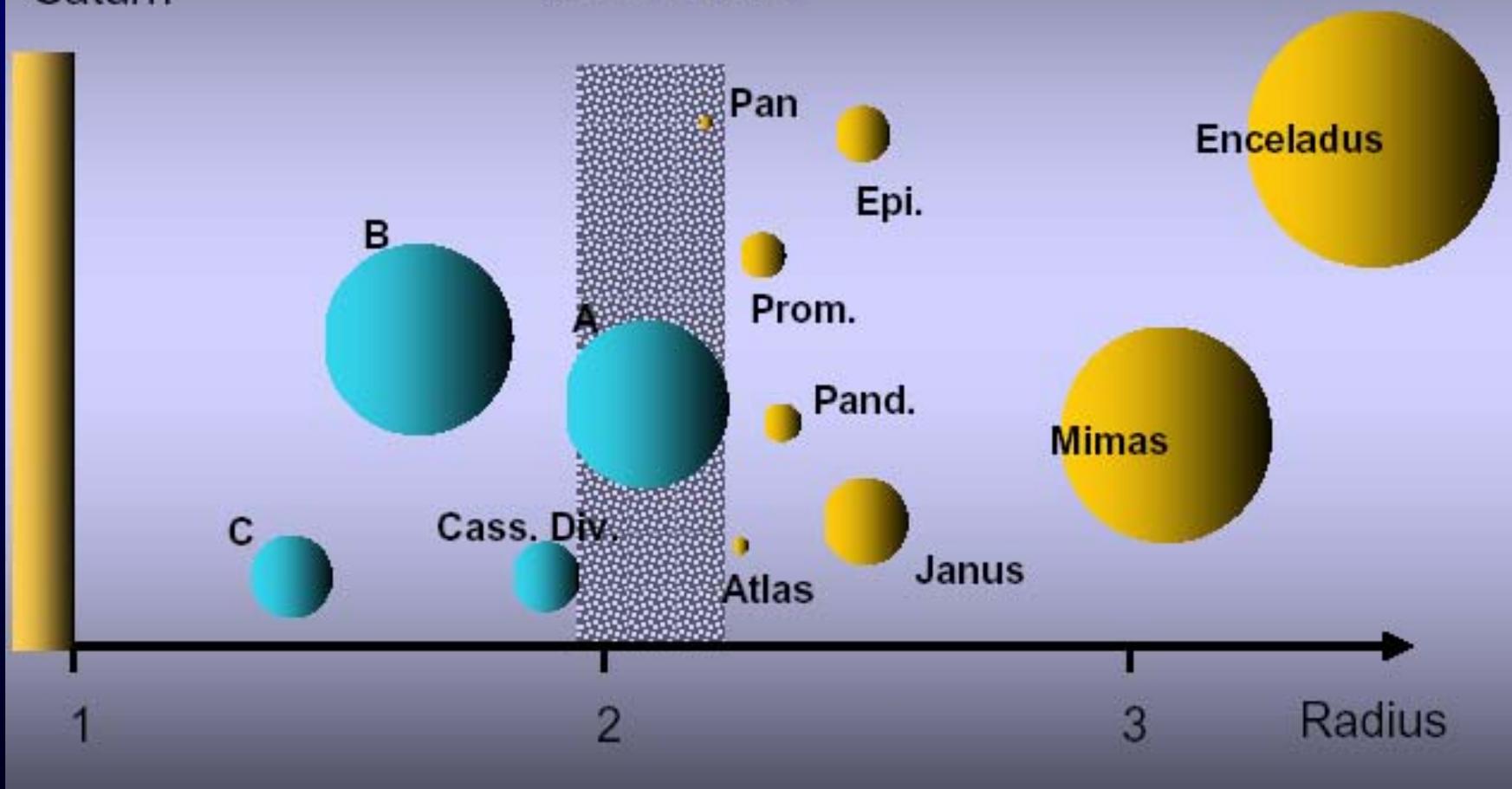
- scalati rispetto al raggio del pianeta;
- - - - - - orbita sincrona
- ..... limite di Roche per oggetti di densità  $1 \text{ g/cm}^3$

Oggetti di forma irregolare e piccoli ( $R \sim 50 \text{ km}$ ) possono rimanere coerenti e non disgregarsi anche se si trovano all'interno del limite di Roche.



Saturn

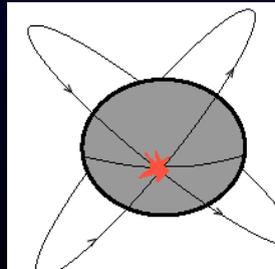
Roche zone



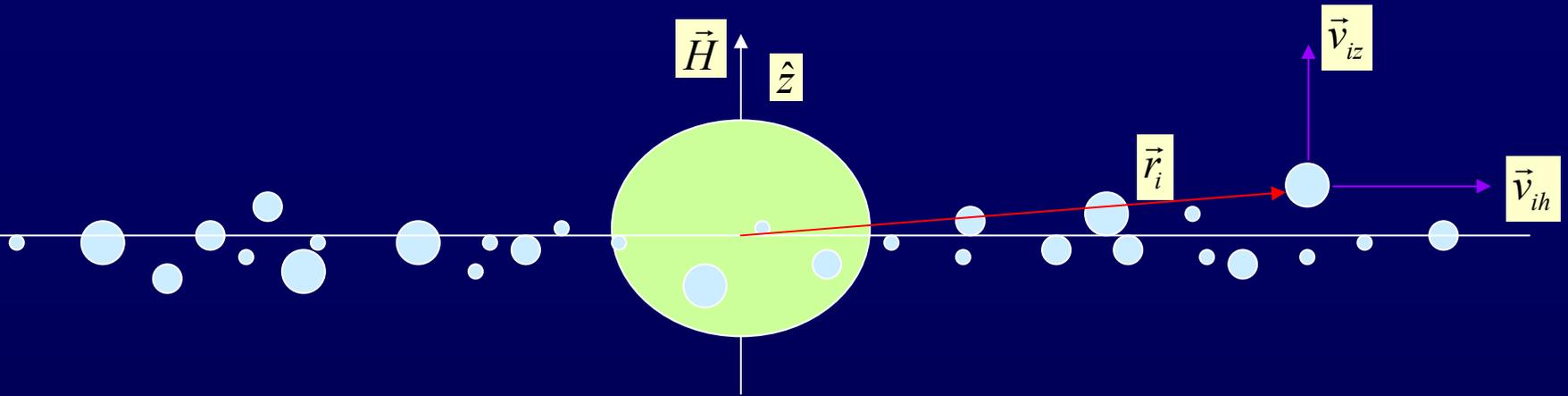
# Flattening

- Se non è sottoposta a collisioni, una particella attraversa almeno due volte il piano equatoriale degli anelli;
- Le collisioni tra particelle provocano una diminuzione dell'energia ma non del momento angolare;
- Poiché la profondità ottica degli anelli è  $\tau \approx 1$ , ad ogni rotazione una particella compie un'oscillazione verticale ed è statisticamente sottoposta almeno ad una collisione (il periodo orbitale degli anelli è di poche ore).
- Questi processi generano uno schiacciamento del disco su un tempo scala uguale al rapporto tra la profondità ottica e la frequenza dell'oscillazione verticale:

$$t_{flattening} = \frac{\tau}{\mu}$$

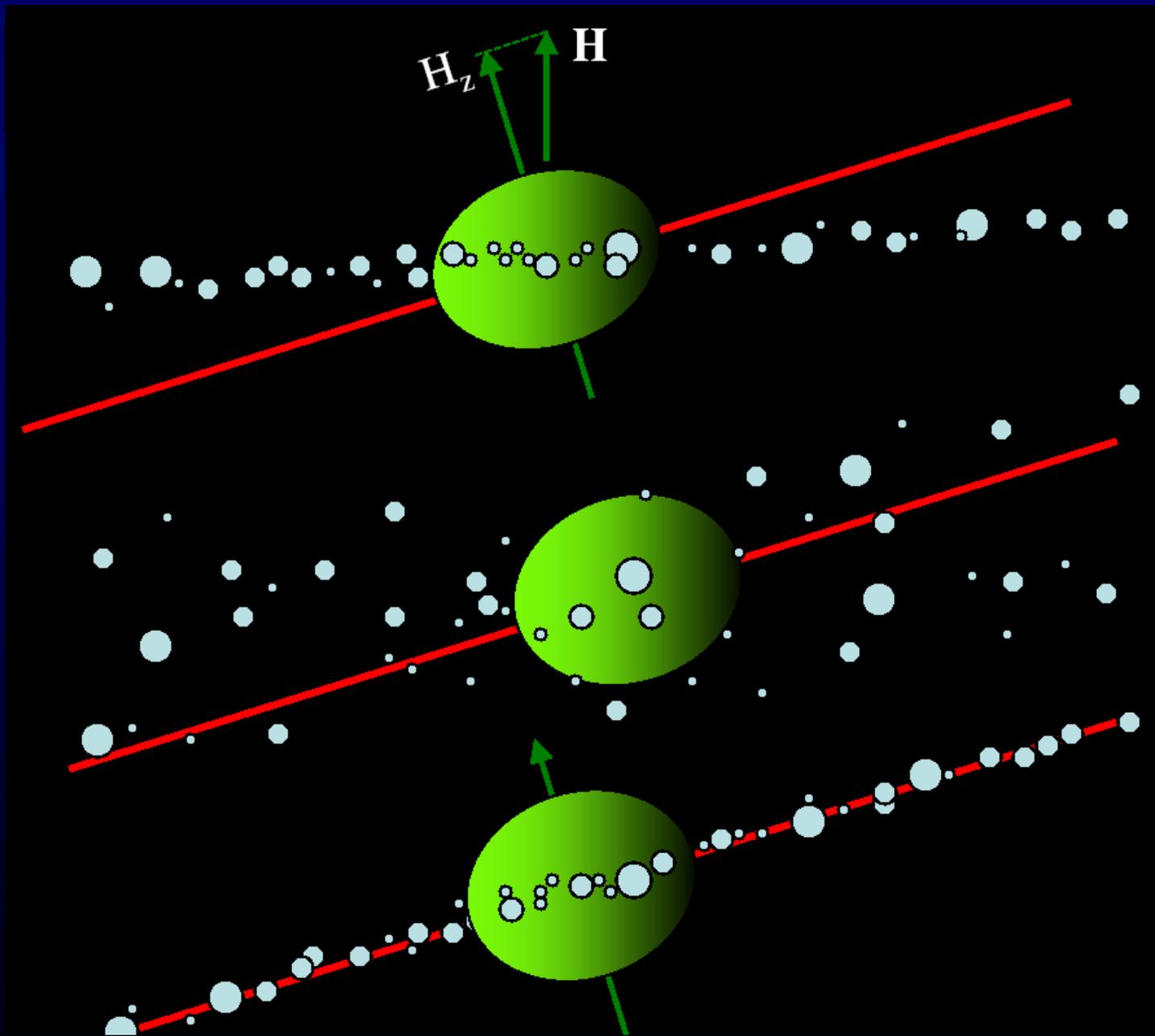


- Un pianeta oblatto esercita delle coppie che alterano il momento angolare delle particelle provocando una precessione delle orbite inclinate.
- Le coppie esercitate e le collisioni tra le particelle sono responsabili di un trasferimento di momento angolare tra il pianeta e gli anelli.
- Solo la componente del momento angolare degli anelli diretta lungo la direzione dell'asse di rotazione del pianeta viene conservata. Le componenti dirette parallelamente all'equatore del pianeta vengono dissipate.
- Le collisioni ad alta velocità smorzano rapidamente i moti relativi tra particelle. Le particelle si dispongono sul piano equatoriale con brevi tempi scala ( $\propto 1/\tau$  orbite se  $\tau \ll 1$ ).



$$\vec{H} = \sum_i m_i \vec{r}_i \times \vec{v}_i = \sum_i m_i \vec{r}_i \times \vec{v}_{iz} + \sum_i m_i \vec{r}_i \times \vec{v}_{ih}$$

$$H = \vec{H} \cdot \vec{z} = \sum_i m_i (\underbrace{\vec{r}_i \times \vec{v}_{iz}}_{=0}) \cdot \vec{z} + \sum_i m_i (\vec{r}_i \times \vec{v}_{ih}) \cdot \vec{z} = \sum_i m_i r_i v_{i\theta}$$



# Addensamento

- Lo scattering gravitazionale tra particelle provoca l'aumento delle velocità.
- Le instabilità gravitazionali (clumping e onde) possono provocare un riscaldamento del disco.
- Questi due processi causano una velocità random delle particelle  $\neq 0$  nonostante lo smorzamento causato dalle collisioni.
- Il campo random delle velocità provoca la comparsa di una viscosità interna grazie alla quale si possono propagare perturbazioni all'interno del disco.
- **RISULTATO:** questi fenomeni tendono a far dissolvere i bordi degli anelli.

# Il parametro di stabilità di Toomre

$$Q_T = \frac{kc_v}{\pi G \sigma_\rho}$$

- $k$  frequenza radiale (epiciclica)
- $\sigma_\rho$  densità di massa superficiale
- $c_v$  velocità di dispersione delle particelle:

$$c_v = H_v \mu$$

- $\mu$  frequenza oscillazioni verticali
- $H_v$  altezza scala gaussiana dell'anello

Se  $Q_T < 1$  allora il disco è instabile su scale spaziali (clumping) dell'ordine di:

$$\lambda = \frac{4\pi G \sigma_\rho}{k^2}$$

- Per gli anelli di Saturno  $\lambda \approx 10\text{-}100$  m.

- Negli anelli grandi particelle si formano per accrescimento e per clumping in pochi giorni; in generale hanno forme irregolari ed orbitano sul piano del disco. Piccole particelle sono maggiormente diffuse lungo la direzione verticale.

- Poiché gli anelli si trovano all'interno del limite di Roche grandi particelle vengono disgregate dalle forze mareali.



Spessore verticale del disco:

$\approx 100$  m per gli anelli A-B-C;

$\approx 2000$  km anello E;

$\approx 100$  km anello G.

Densità verticale di particelle  
(gaussiana):

$$n(z) = n_0 e^{-\frac{z^2}{z_0^2}}$$

"Dynamic Ephemeral Bodies"  
(DEB's). Rendering di W. K.  
Hartmann

# Diffusione

- In seguito alle collisioni il disco degli anelli si espande lungo la direzione radiale con un tempo scala di:

$$t_d = \frac{l^2}{\nu_v}$$

- $l$  ampiezza radiale dell'anello;
- $\nu_v$  viscosità dell'anello. Dipende dalle velocità collisionali e dalla profondità ottica dell'anello. Per piccoli  $\tau$  può essere trascurato il diametro delle particelle:

$$\nu_v \approx \frac{c_v^2}{2\mu} \left( \frac{\tau}{1 + \tau^2} \right)$$

- Per  $l=6 \cdot 10^9$  cm (estensione radiale degli anelli C-A) e con  $\nu_v = 100$  cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, il tempo scala è comparabile con l'età del sistema solare. Per  $l$  minori i tempi scala si riducono. La diffusione indotta dalla viscosità interna degli anelli provoca una rapida rimozione di tutte le strutture fini (gap e divisioni).

# Instabilità viscosa

- In generale la viscosità provoca la distruzione delle strutture.
- Un anello diventa instabile per clumping lungo la direzione radiale se la coppia viscosa  $v_v \sigma_\rho$  è una funzione decrescente della densità superficiale:

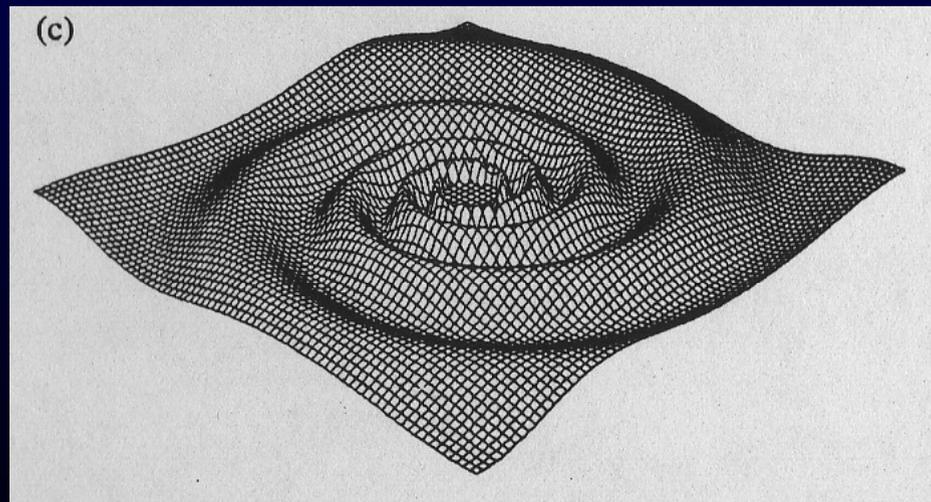
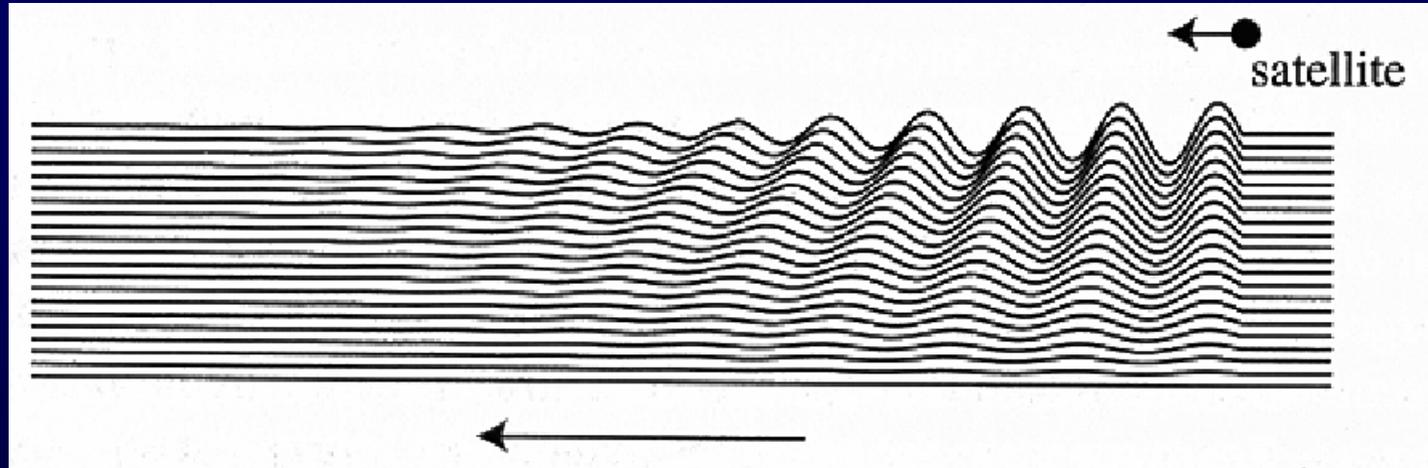
$$\frac{d(v_v \sigma_\rho)}{d\sigma_\rho} < 0 \rightarrow \text{instabilità}$$

- Se la  $\sigma_\rho$  è proporzionale a  $\tau$  allora si ottiene la condizione di instabilità:

$$\frac{\tau}{c_v} \frac{dc_v}{d\tau} + \frac{1}{1+\tau^2} < 0 \rightarrow \text{instabilità}$$

- Poiché  $c_v > 0$  e  $\tau > 0$  allora un anello è viscosamente instabile se la dispersione delle velocità delle particelle decresce rapidamente mentre la  $\tau$  aumenta.
- Questo implica che un gran numero di particelle possano essere diffuse da regioni aventi  $\tau$  minori verso regioni con  $\tau$  maggiori. Il processo inverso è meno probabile.
- In seguito a questo meccanismo di diffusione una perturbazione di densità viene amplificata fino alla formazione di un ringlet.
- Poiché  $1/(1+\tau^2) > 0$  e decresce se  $\tau$  aumenta allora l'instabilità viscosa diventa più probabile all'interno degli anelli aventi  $\tau$  maggiore (anello B).
- Da misure sperimentali risulta che  $c_v$  diminuisce se  $\tau$  aumenta ma non a sufficienza da generare instabilità viscosa. Le strutture osservate negli anelli più densi devono dipendere dalle condizioni di formazione iniziali.

# 5. RISONANZE INTERAZIONI ANELLI-SATELLITI



# Risonanze

- Il disco degli anelli può essere considerato come un oscillatore perturbato localmente dal campo gravitazionale indotto dai satelliti esterni.
- Un oscillatore, avente un certo periodo naturale  $T_n$ , che venga sollecitato da una forza periodica esterna con periodo  $T \rightarrow T_n$  è sottoposto a risonanza.
- Le risonanze avvengono in regioni dove le frequenze (radiali e/o verticali) degli anelli sono uguali ad una delle componenti (radiali e/o verticali) delle frequenze dei satelliti.
- Il mantenimento nel tempo di queste sollecitazioni in fase genera delle strutture coerenti (addensamenti ed onde) nel disco.

# Frequenza forzante

- Analisi del potenziale gravitazionale del satellite in componenti di Fourier.
- La frequenza forzante  $\omega_f$  è data dalla somma delle componenti (multipli interi  $m_\theta$ ,  $m_z$ ,  $m_r$ ) delle frequenze angolare (azimuthale)  $n_s$ , verticale  $\mu_s$  e radiale  $k_s$  del satellite:

$$\omega_f = m_\theta n_s + m_z \mu_s + m_r k_s$$

- $m_\theta > 0$ ,  $m_z$  pari per forzante orizzontale, dispari per forzante verticale

# Risonanze orizzontali e verticali

- Una particella posta a distanza  $r_L$  o  $r_v$  dal pianeta si trova in risonanza orizzontale (di Lindblad) o verticale se sono verificate le condizioni:

$$\omega_f - m_\theta n(r_L) = \pm k(r_L) \quad \text{Risonanza di Lindblad (orizzontale)}$$

$$\omega_f - m_\theta n(r_v) = \pm \mu(r_v) \quad \text{Risonanza verticale}$$

- + risonanza esterna, - risonanza interna.
- Negli anelli planetari sono più importanti le risonanze interne (-) poiché i satelliti sono esterni agli anelli (per via della definizione del limite di Roche): le frequenze angolari dei satelliti  $n_s$  sono inferiori di quelle delle particelle degli anelli.

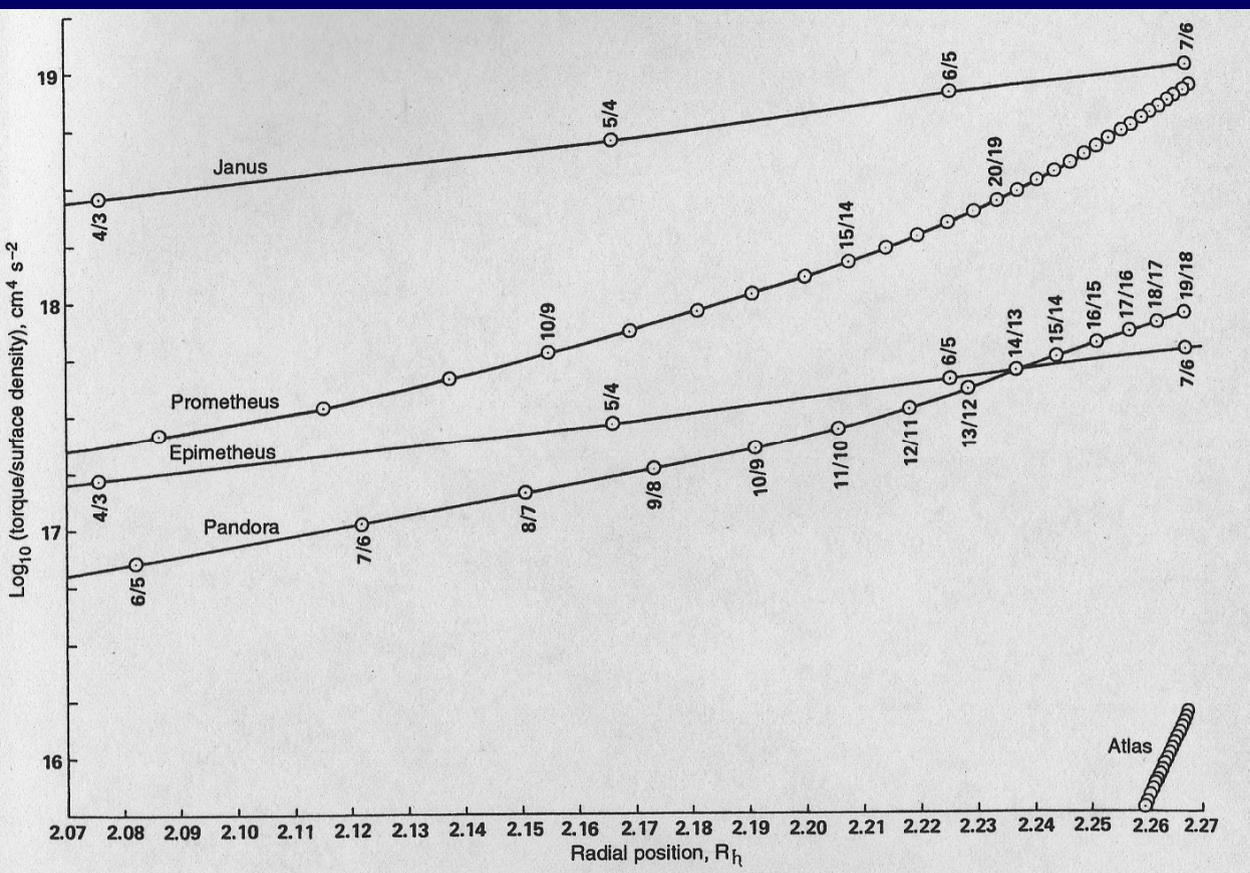
# Notazione delle risonanze

- Le differenze tra le frequenze orbitale, radiale e verticale raggiunge qualche percento.
- Quando  $m_\theta \neq 1$  si può assumere  $\mu \approx n \approx k$  e valutare la risonanza secondo la notazione:

$$\frac{n(r_{L,v})}{n_s} \approx \frac{m_\theta + m_z + m_r}{m_\theta - 1}$$

- In teoria se  $\mu = n = k$  allora la posizione delle risonanze orizzontali e verticali coincidono  $r_L = r_v$ .
- In realtà poiché Saturno è oblatto si ha  $\mu > n > k$  e  $r_L > r_v$ .
- L'intensità della risonanza dipende dalla massa  $M_s$ , inclinazione  $i$  ed eccentricità e del satellite:

$$I \propto M_s e^{|m_r|} \sin^{|m_z|}(i)$$



Risonanze di Lindblad  
all'interno dell'anello A.

Lissauer, Cuzzi (1982)

● Risonanze di Lindblad più intense:

$$m_z = m_r = 0 \quad \frac{m_\theta}{m_\theta - 1}$$

● Risonanze verticali più intense:

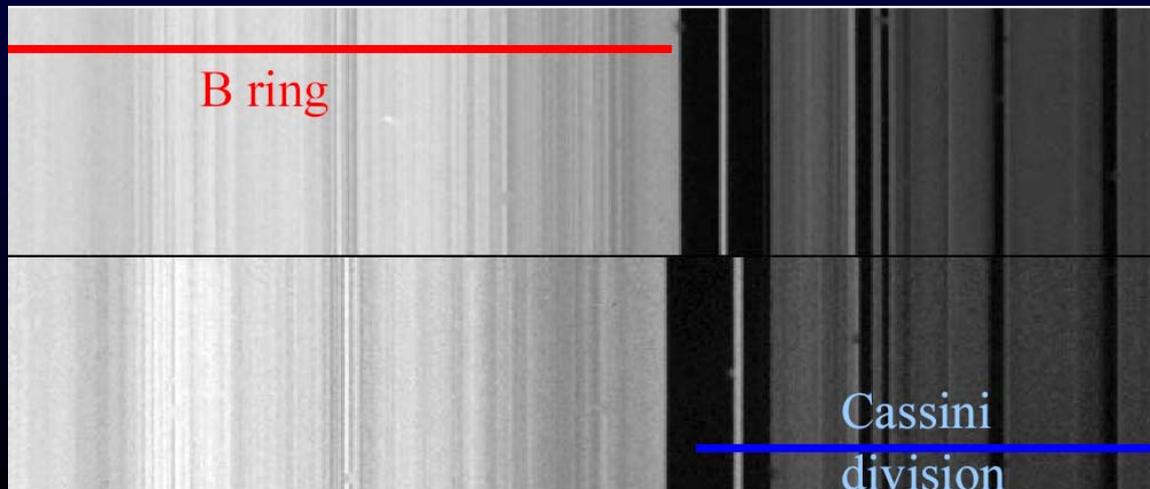
$$m_z = 1, \quad m_r = 0 \quad \frac{m_\theta + 1}{m_\theta - 1}$$

# Formazione delle strutture

- Le risonanze provocano un trasferimento secolare di momento angolare orbitale con conseguente formazione di diverse strutture:
  - Bordi delle divisioni e delle gap
  - Onde di densità spirali
  - Onde di densità di curvatura (bending)

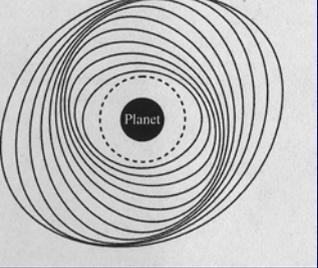
# Bordi delle divisioni e delle gap

- Il bordo esterno dell'anello B (bordo interno della CD) coincide con la risonanza di Lindblad interna di Mimas  $M2:1$ : una particella degli anelli orbita attorno a Saturno 2 volte mentre Mimas una volta. Su due punti opposti gli anelli mostrano un'eccentricità introdotta da Mimas.
- Il bordo esterno dell'anello A coincide con la risonanza  $7:6$  dei satelliti co-orbitanti Janus ed Epimetheus.



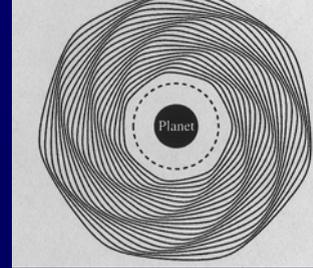
# Generazione e propagazione delle onde sul disco

- L'interazione gravitazionale tra una particella ed un satellite avviene prevalentemente durante il loro close-encounter.
- Poiché il loro moto non è esattamente simmetrico durante l'incontro, avviene una riduzione della componente tangenziale della velocità relativa della particella rispetto al satellite. In questo modo si ha uno scambio di momento angolare che provoca la comparsa di una coppia sull'anello.
- Una particella posta originariamente su un'orbita circolare acquista velocità radiale assumendo un'orbita kepleriana.
- Nel riferimento co-rotante con il satellite, tutte le particelle inizialmente poste su orbite circolari seguono uguali spostamenti dopo l'incontro (onda stazionaria).
- Nel riferimento inerziale ogni particella si muove indipendentemente su orbita kepleriana; ma i pericentri di queste orbite e le loro fasi creano un'onda sinusoidale che si propaga attraverso gli anelli con la stessa velocità angolare del satellite.



2:1 (m=2)

# Onde spirali di densità

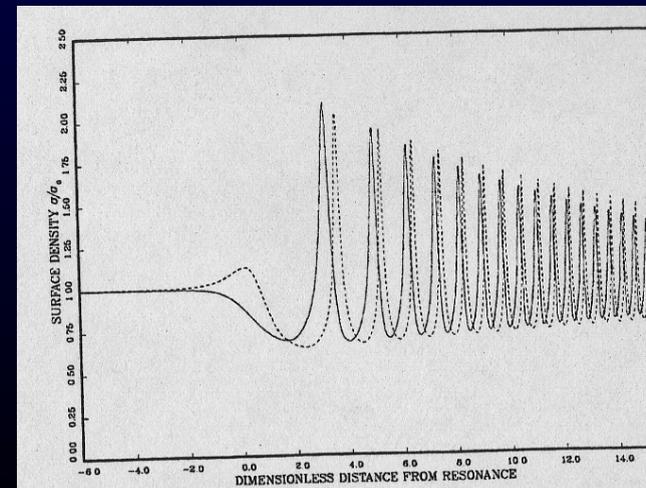


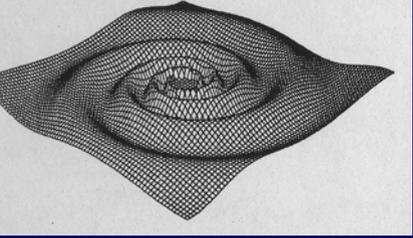
7:6 (m=7)

- La gravità di un satellite induce un moto epicyclico (con componente radiale ed azimuthale) alle particelle dell'anello situate in prossimità delle posizioni di risonanza di Lindblad  $r_L$ .
- L'autogravità del disco fornisce l'energia necessaria alla propagazione della perturbazione verso le regioni esterne dell'anello  $r > r_L$ . Queste onde si smorzano progressivamente allontanandosi lungo la direzione radiale.
- In regime lineare ( $\Delta\sigma_\rho/\sigma_\rho \ll 1$ ) le onde spirali indotte hanno lunghezza d'onda caratteristica:

$$\lambda_{density} = \frac{4\pi^2 G \sigma_\rho}{m_\theta^2 (\omega_f - n(r)) - k^2(r)}$$

- $\sigma_\rho$  densità di massa superficiale ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ).
- Molte onde di densità di Saturno hanno  $\Delta\sigma_\rho/\sigma_\rho \sim 1$  ed è necessario usare una teoria non lineare. Come conseguenza i profili di densità superficiale seguono una sinusoide smorzata molto piccata.

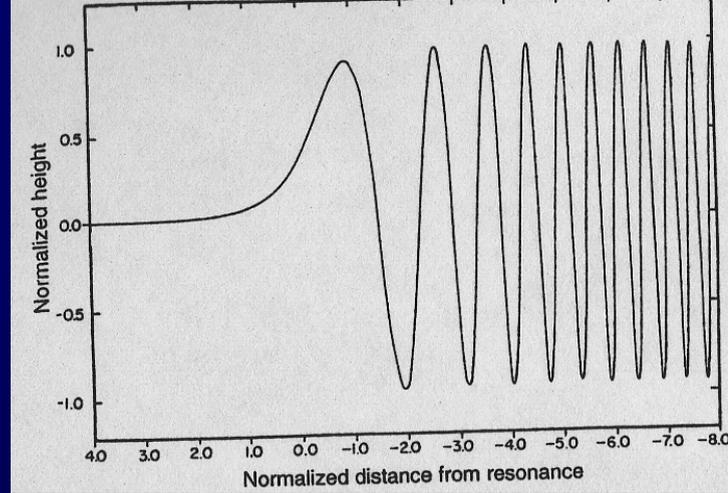




# Onde di densità verticale

- Le onde di densità verticale (bending) sono generate dalla componente verticale del campo gravitazionale dei satelliti posti in orbita inclinata rispetto al piano degli anelli.
- Le massime oscillazioni ( $\sim 400$  m) del disco lungo la direzione verticale sono causate dal campo gravitazionale del Sole e di Titano (warped disk).
- Le onde di densità verticale seguono gli stessi meccanismi (propagazione e smorzamento) già citati per le onde spirali di densità.
- Il numero di braccia spirali che si formano è dato da  $m_\theta$ ; sugli anelli di Saturno sono state osservate onde fino a  $m_\theta=30$ .
- Per  $m_\theta > 1$  si hanno onde di densità verticale che si propagano verso Saturno  $r < r_v$ .
- Per  $m_\theta = 1$  si hanno onde verticali nodali che si propagano verso l'esterno  $r > r_v$ .

- Ignorando lo smorzamento viscoso l'altezza verticale del disco perturbato è dato dall'integrale di Fresnel.



- Al di fuori della posizione di risonanza la lunghezza d'onda della perturbazione è:

$$\lambda_{bending} = \frac{4\pi^2 G \sigma_\rho}{m_\theta^2 (\omega_f - n(r)) - \mu^2(r)}$$

- Assumendo orbite kepleriane si ha:
- Lunghezze d'onda caratteristiche:

$$n(r) = \sqrt{\frac{GM_P}{r^3}} = \mu(r) \quad m_\theta > 1$$

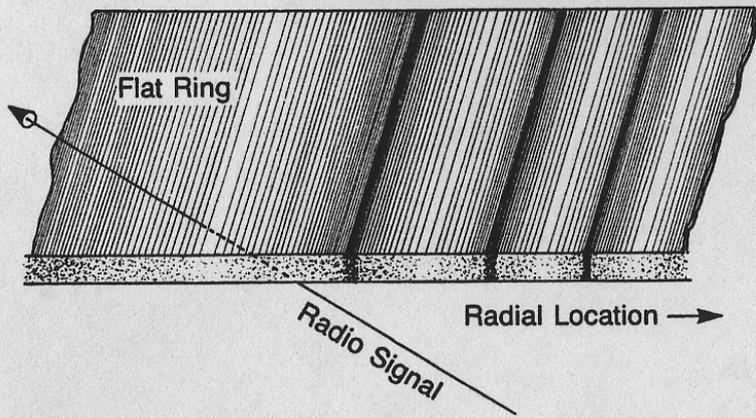
$$\lambda(r)_{bending} \approx 3.08 \left( \frac{r_v}{R_{Saturno}} \right)^4 \frac{\sigma_\rho}{m_\theta - 1} \frac{1}{r_v - r} \quad m_\theta > 1$$

$$\lambda(r)_{bending} \approx 54.1 \left( \frac{r_v}{R_{Saturno}} \right)^6 \frac{1}{r_v - r} \quad m_\theta = 1$$

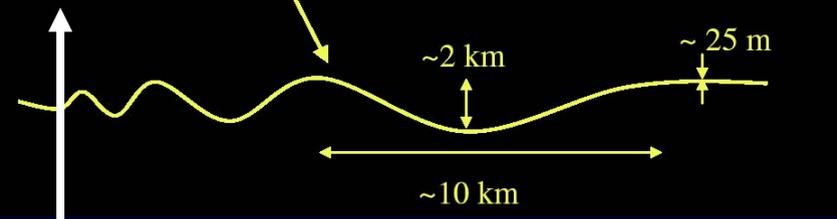
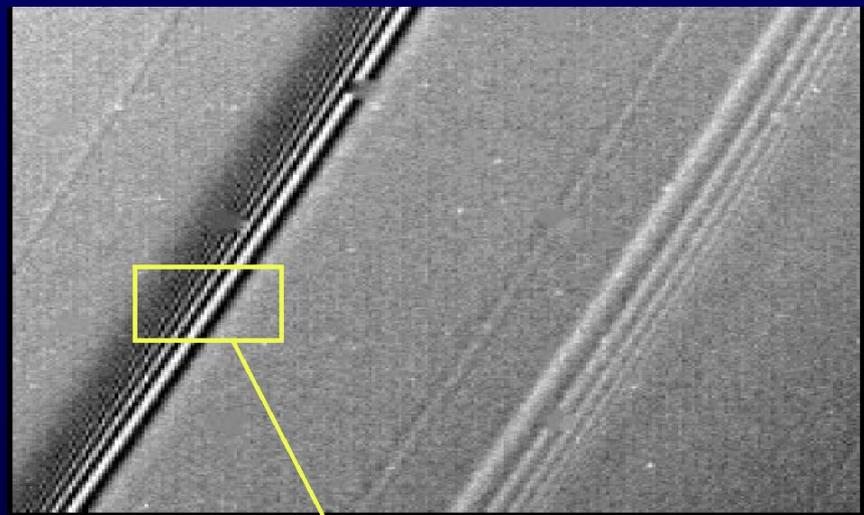
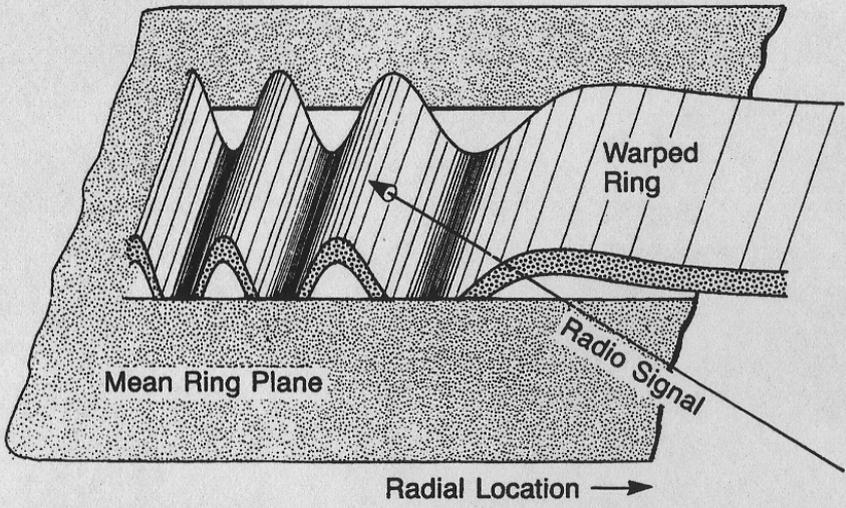
Onda di densità  
(Pandora+Prometheus 12:11)



(a) Density Wave: Number Density Changes with Radius

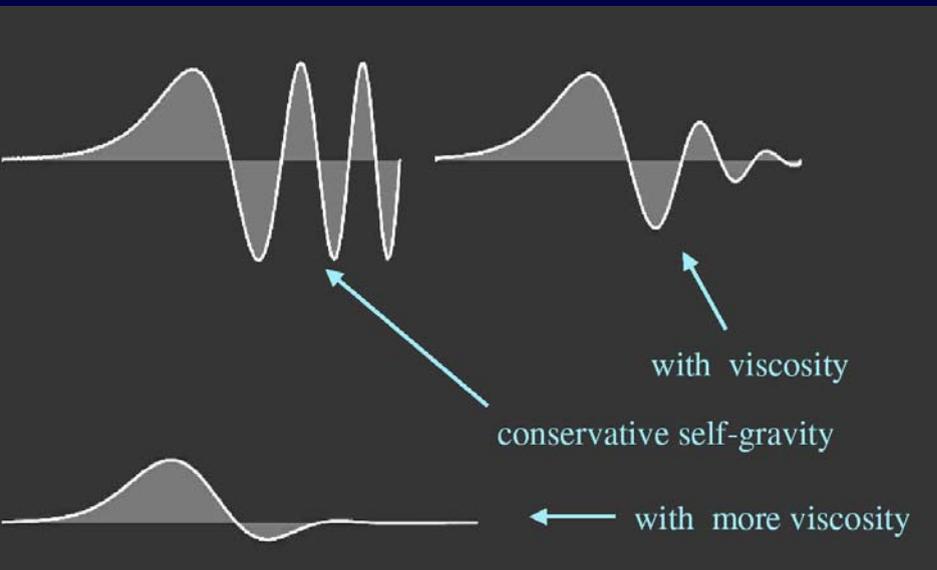
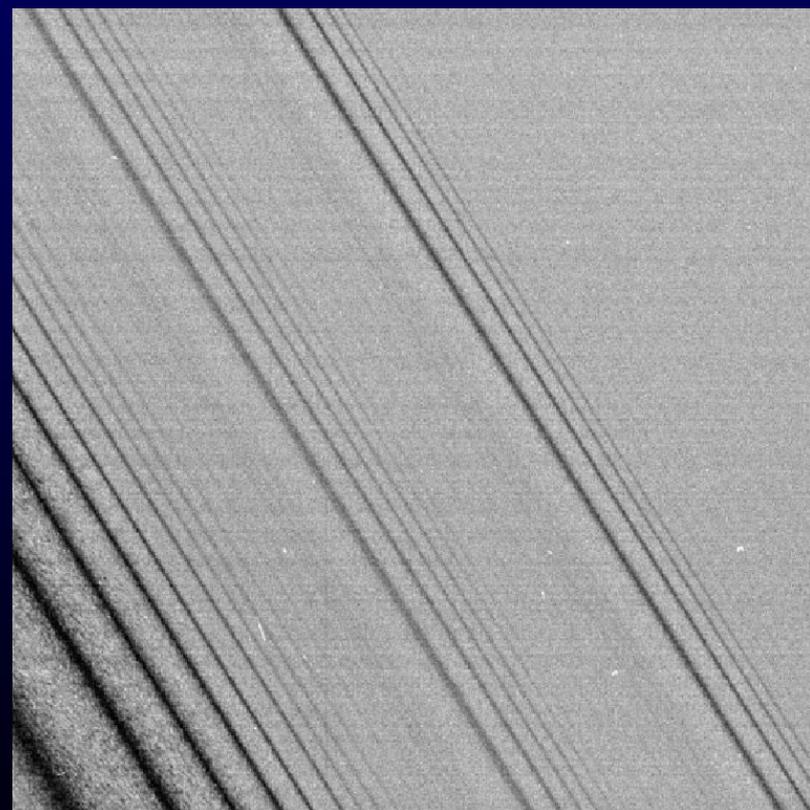
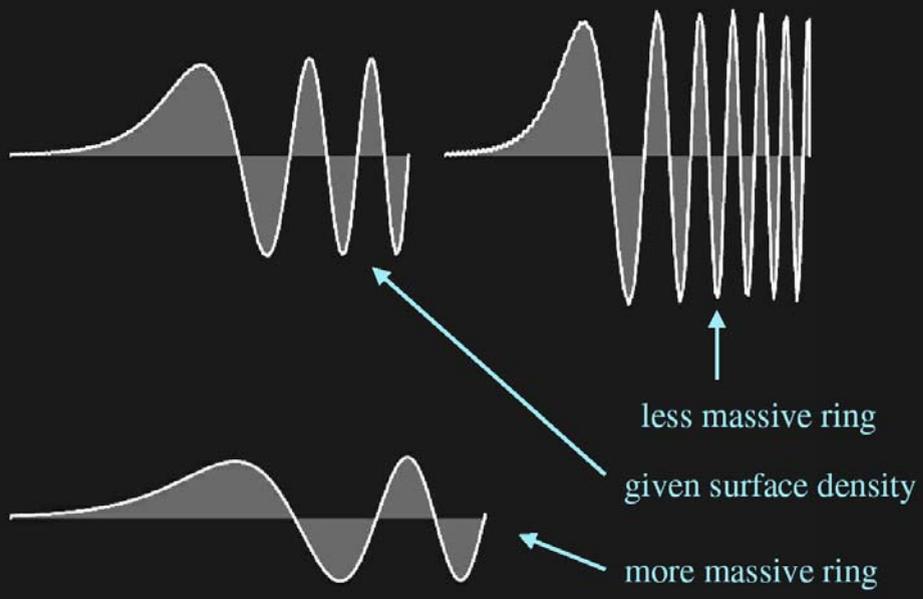


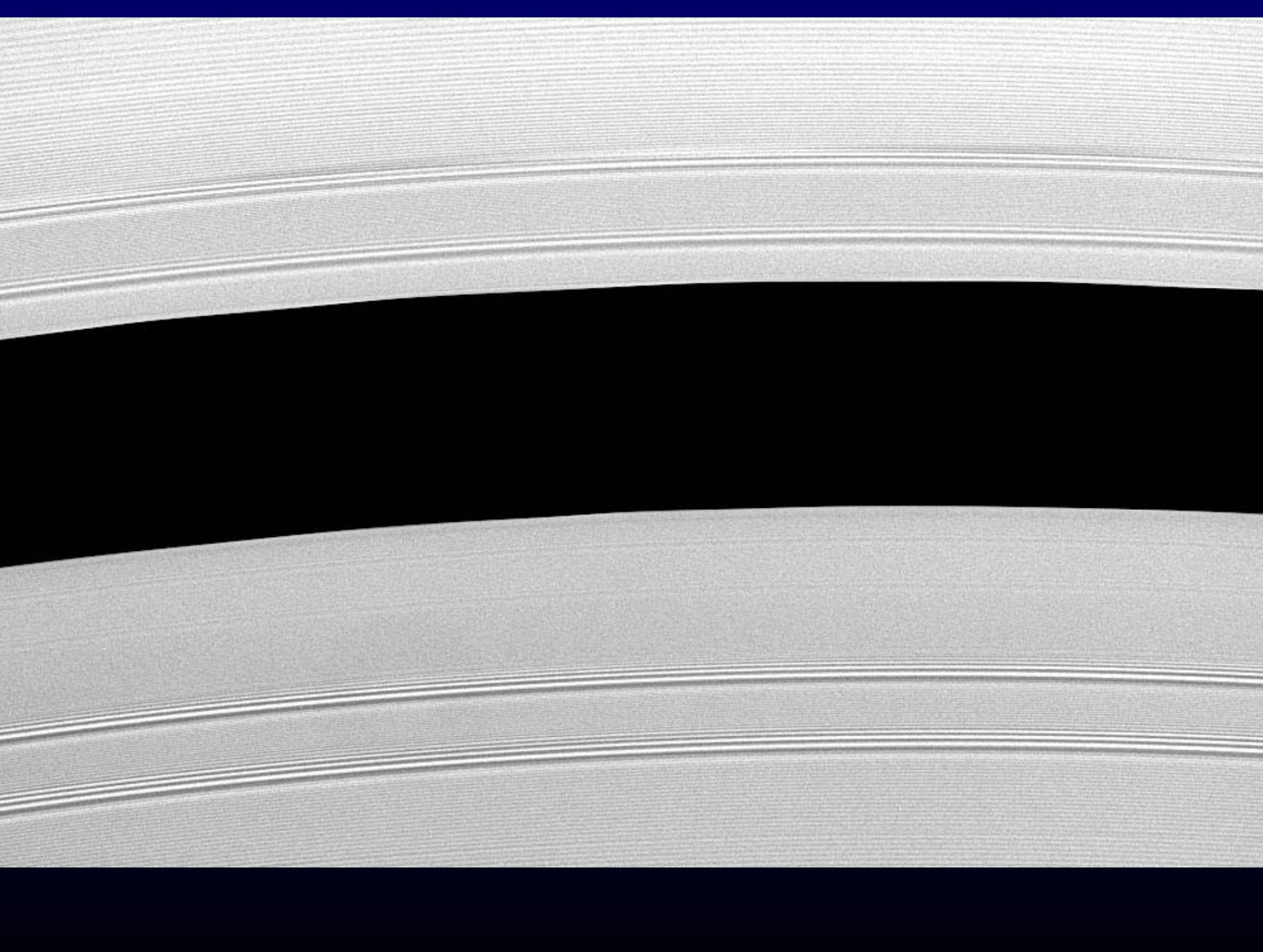
Bending Wave: Pathlength Changes with Radius



Onda di densità verticale  
(M5:3)

Rosen, (1989)





# Parametri delle onde

- Angolo di apertura (dalla traiettoria circolare):  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  rad; per le galassie spirali  $>0.1$  rad.
- $\lambda$  delle onde:  $\sim 10$  km.
- Densità superficiale determinata dalle osservazioni delle caratteristiche delle onde:  
anelli A, B:  $50 \text{ g cm}^{-2}$ ; anello C:  $1 \text{ g cm}^{-2}$ ; CD  $10 \text{ g cm}^{-2}$ .
- Errore relativo tra posizioni teoriche ed effettive delle onde: 0.0001

# Interazioni anelli-satelliti

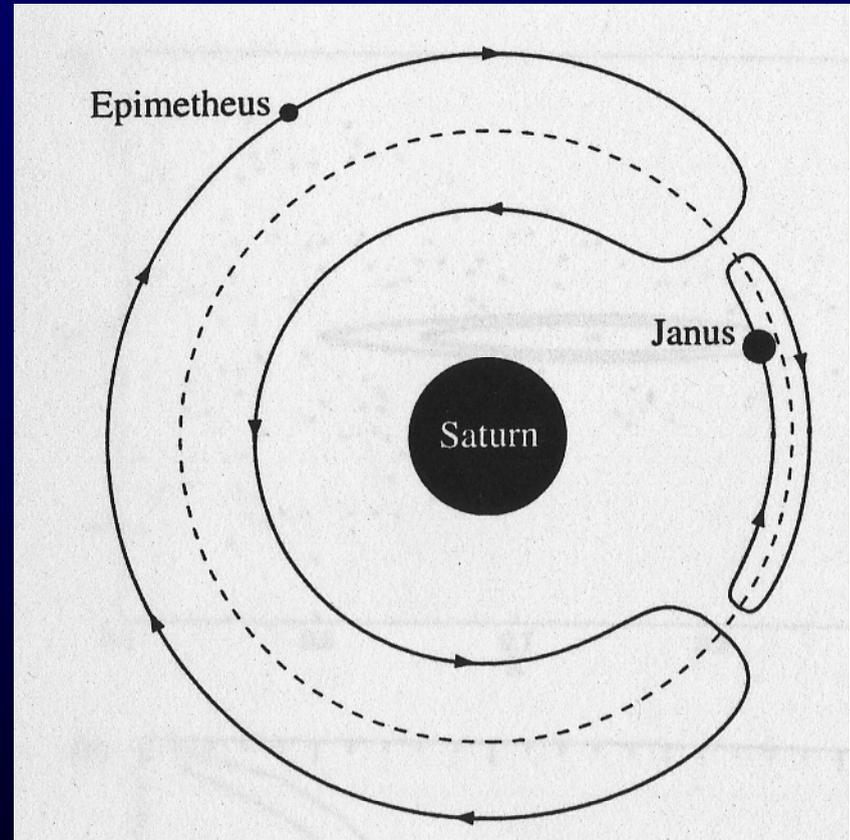
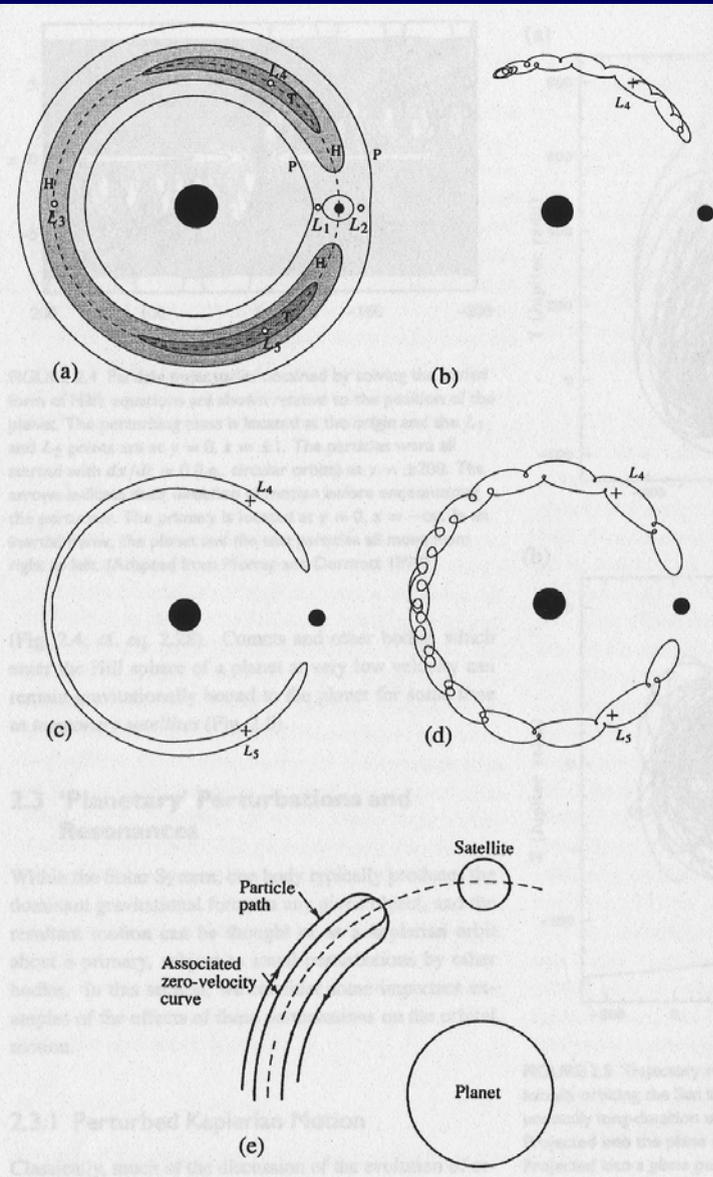
- Gli anelli ed i satelliti adiacenti si respingono l'un l'altro attraverso il trasferimento di momento angolare grazie alle onde di densità risonanti.
- Come nel caso dell'allargamento di un disco viscoso in rotazione gran parte del momento angolare viene trasferito verso le regioni esterne mentre la massa tende a concentrarsi verso l'interno.
- La trasmissione risonante di energia da un satellite interno (Prometheus) ad uno esterno (Pandora) provoca un rilascio di energia seguente al riscaldamento dovuto alle deformazioni mareali.
- Il trasferimento di energia dall'esterno verso l'interno del disco è sempre un processo instabile.

# Shepherding

- Il processo di shepherding consiste nella repulsione delle particelle degli anelli orbitanti vicino ad un satellite.
- Il satellite infatti perturba su orbite eccentriche le particelle ad esso vicine. Le collisioni tra le particelle smorzano il processo: come conseguenza si ha una repulsione secolare tra il satellite e le particelle.
- La dinamica di una particella dell'anello può essere determinata mediante la conservazione della costante del moto di Jacobi (problema circolare ristretto dei tre corpi):

$$C_J = x^2 + y^2 + \frac{2m_1}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} + \frac{2m_2}{|\vec{r} - \vec{r}_2|} - v^2$$

# Punti lagrangiani ed orbite

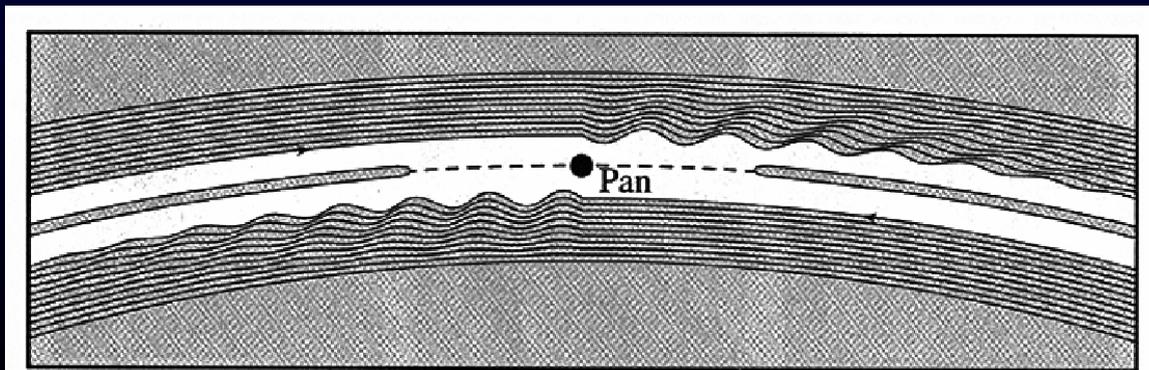


# Oscillazioni indotte

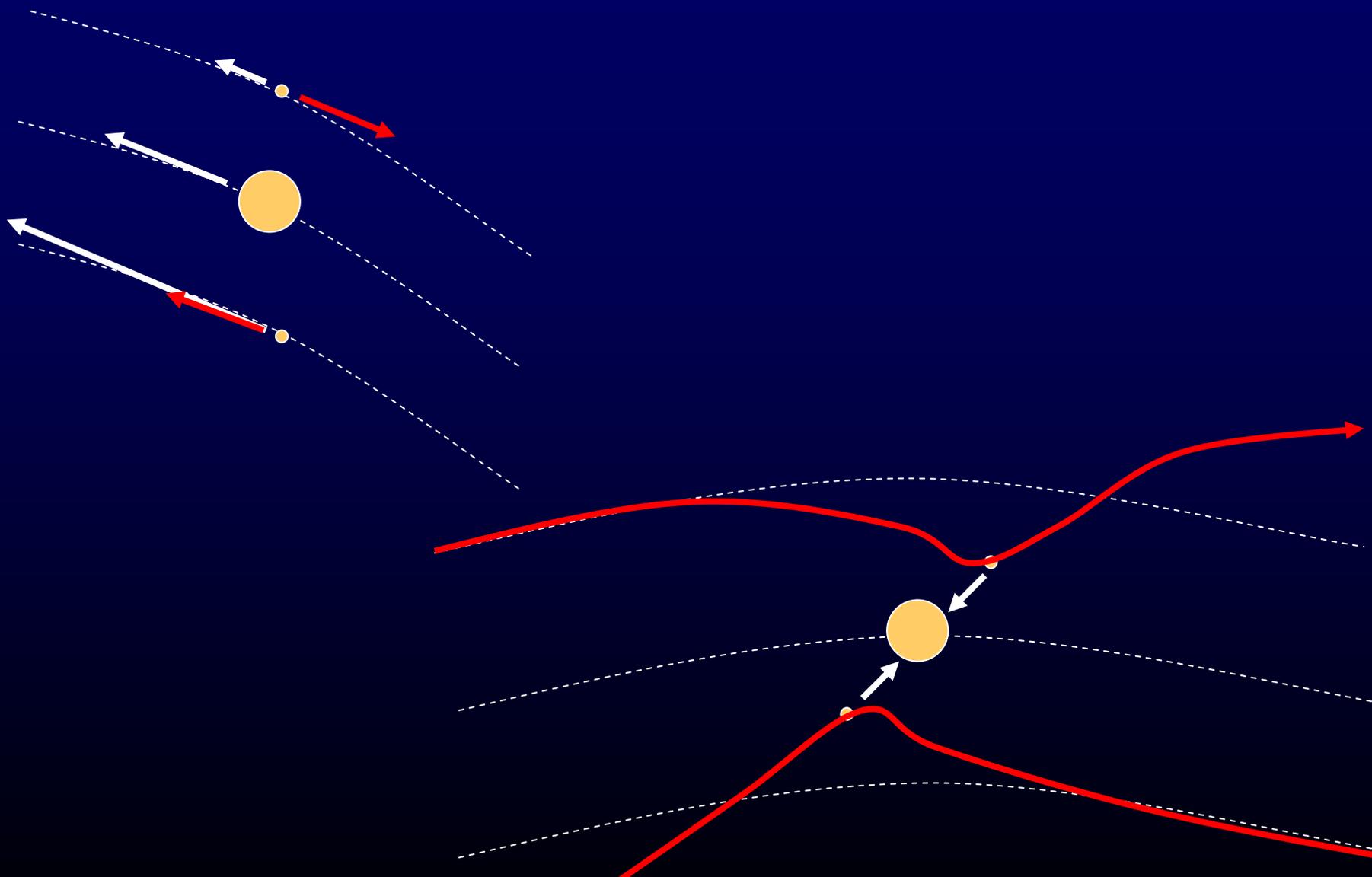
- Il moto delle particelle degli anelli rispetto al satellite è quasi stazionario (moto epicyclico trascurabile).
- Durante un periodo epicyclico le particelle sono sottoposte ad un'oscillazione indotta (rispetto alla traiettoria del satellite) di lunghezza d'onda:

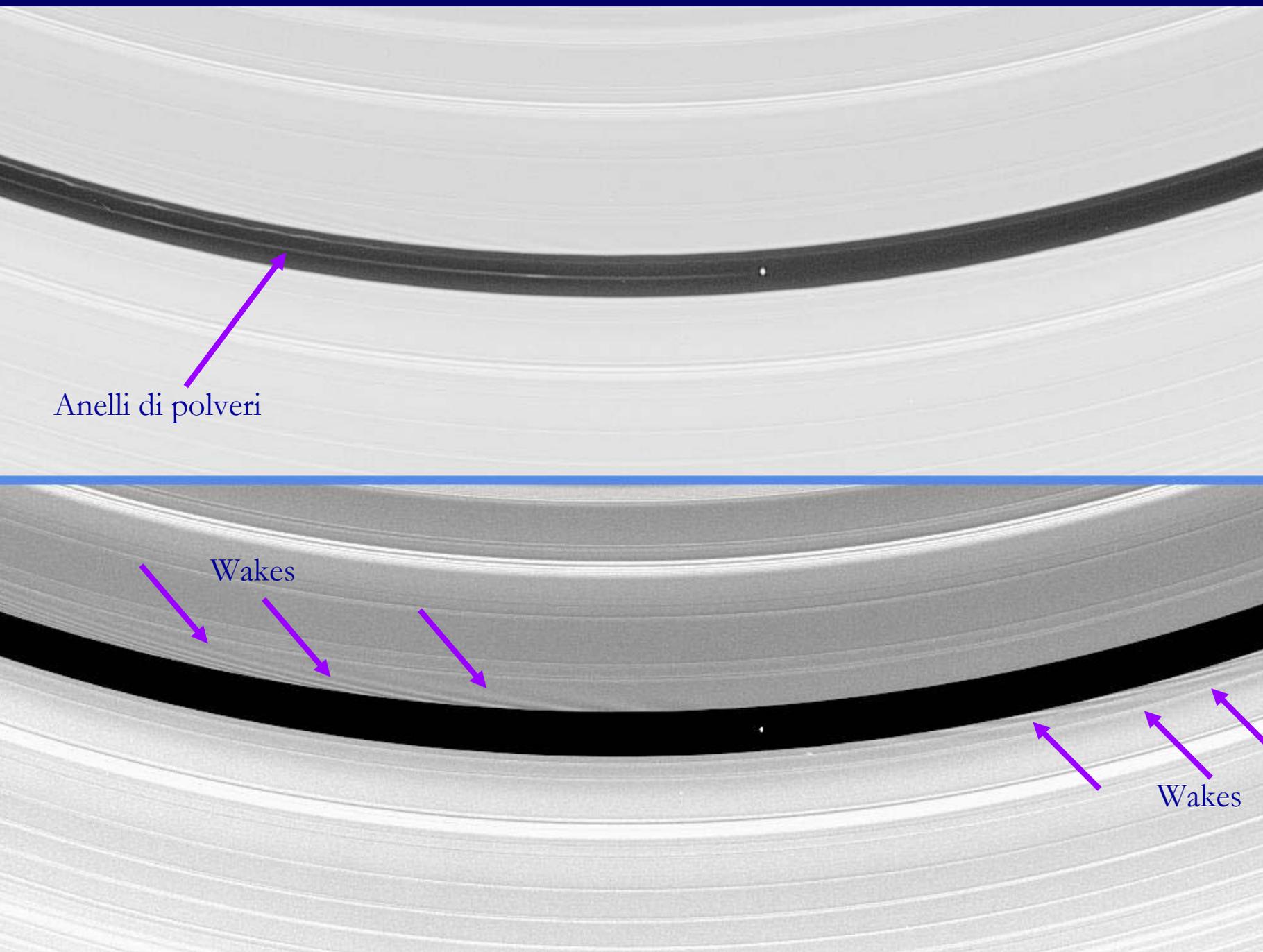
$$\lambda_{edge} \approx 3\pi|\Delta a|$$

- $\Delta a = a_{anello} - a_{satellite}$ ,  $a$  = semiasse maggiore orbitale.
- Questo pattern è stazionario nel sistema rotante.



# Sorveglianza dei confini delle gap





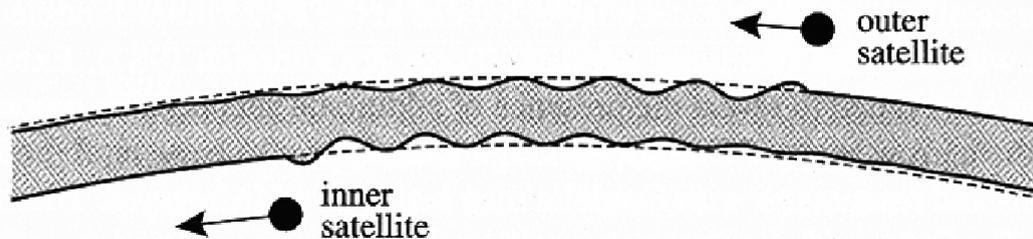
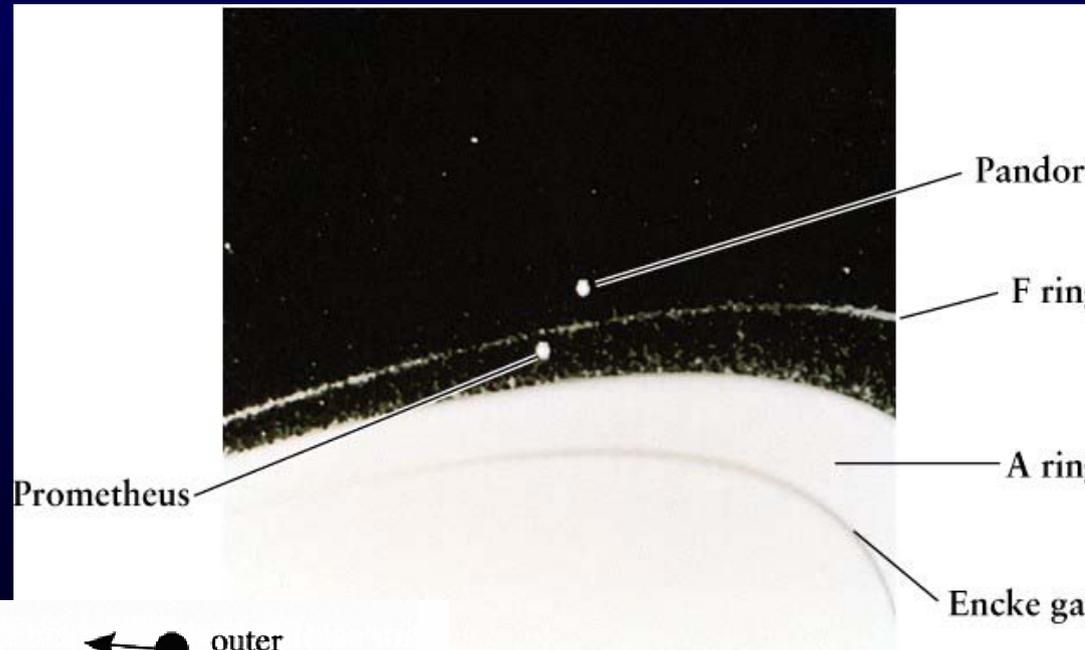
Anelli di polveri

Wakes

Wakes

# Shepherding doppio - Confinamento

- Il fenomeno dello shepherding si osserva anche tra i satelliti Prometheus e Pandora che confinano il sottile l'anello F.



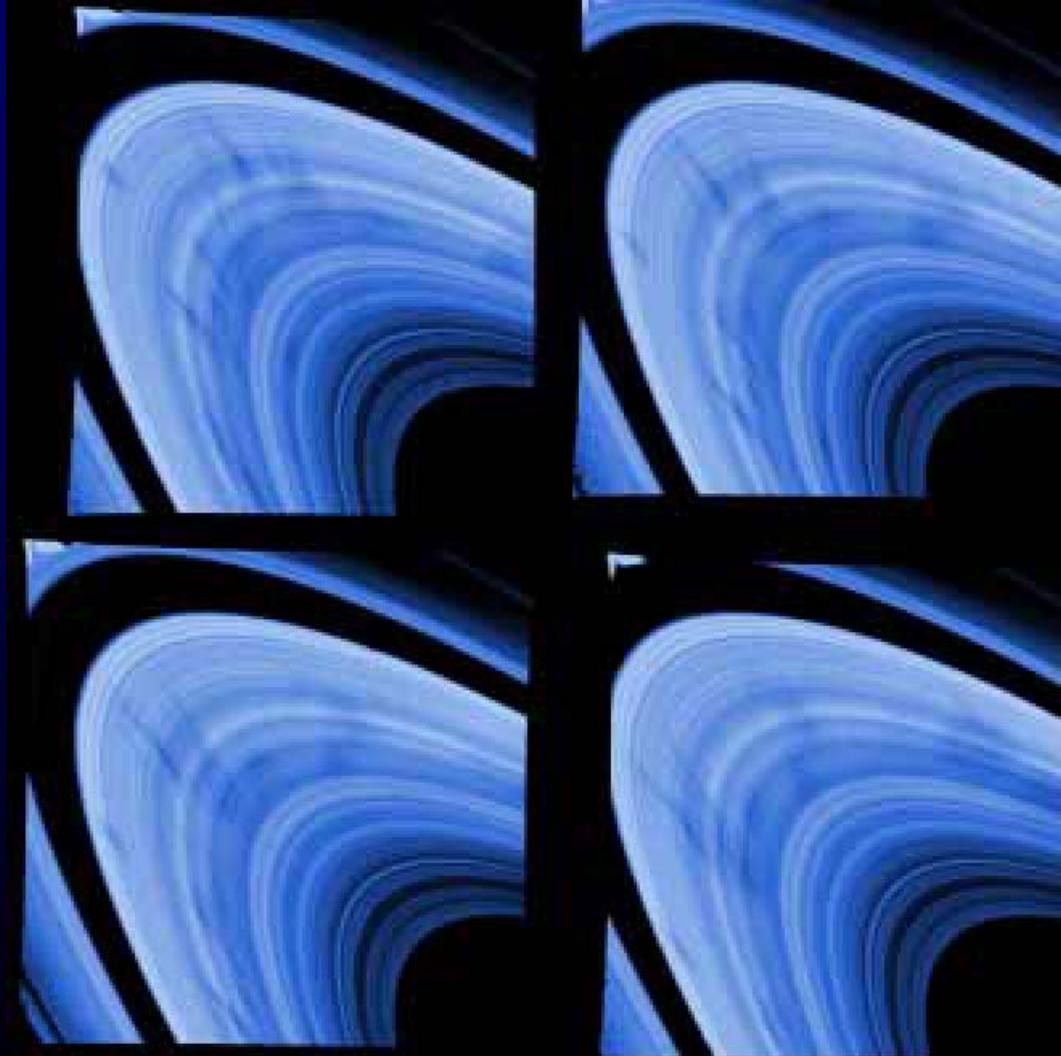
Janus



Prometheus



# 6. INTERAZIONI POLVERI-CAMPI E.M.



# Processi fisici

- Particelle degli anelli di dimensioni  $> 1$  mm risentono solo degli effetti gravitazionali e collisionali.
- Particelle di dimensioni  $< 1$  mm (polveri) sono sottoposte all'interazione con il campo e.m.
- Processi attivi sulle polveri:
  - Pressione di radiazione;
  - Effetto Poynting-Robertson;
  - Interazione con la magnetosfera: formazione degli spokes.

# Pressione di radiazione

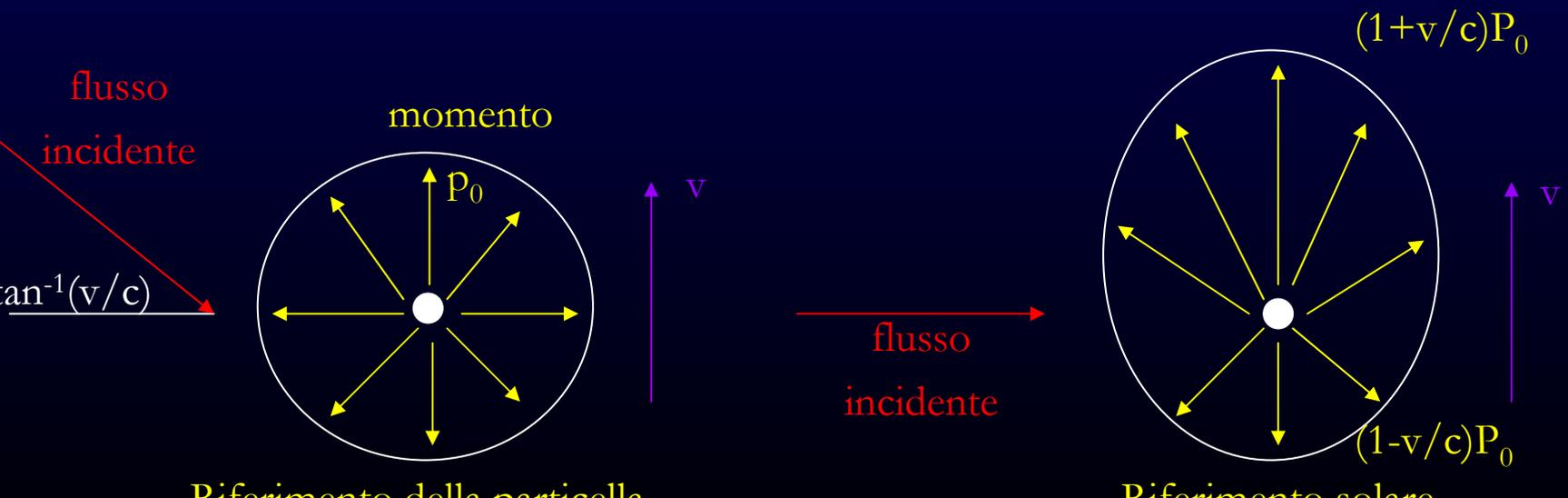
- Interessa soprattutto particelle di dimensioni  $\approx \mu\text{m}$
- La pressione di radiazione solare spinge le particelle di polvere verso l'esterno del s.s.

$$\vec{F}_{rad} \cong \frac{L_{sun} A}{4\pi c r_{sun}^2} Q \hat{r}$$
$$\beta = \frac{\vec{F}_{rad}}{\vec{F}_g} = 5.7 \cdot 10^{-5} \frac{Q}{\rho R}$$

- $L_{sun}$  luminosità solare,  $A$ ,  $R$ ,  $\rho$  cross-section, raggio e densità del grano di polvere,  $Q$  coeff. di pressione di radiazione (emissività-assorbimento),  $r_{sun}$  distanza sole-target.

# Effetto Poynting-Robertson

- Interessa particelle di dimensioni  $\approx$ cm.
- Un grano di polvere, riscaldato dalla radiazione solare irraggia in maniera isotropa nel riferimento del grano ma in modo preferenziale lungo la direzione del moto nel riferimento solare.
- Questo processo provoca una perdita di energia e di momento del grano che tende a spiraleggiare verso il Sole.



# Pressione di radiazione + effetto P.R.

$$\vec{F}_{rad} \cong \frac{L_{sun} A Q}{4\pi c r_{sun}^2} \left(1 - \frac{v_r}{c}\right) \hat{r} - \frac{L_{sun} A Q v}{4\pi c^2 r_{sun}^2} \left(1 - \frac{v_r}{c}\right) \hat{v}$$

- In genere grani diffusi nel mezzo interplanetario vengono rimossi dalla pressione solare:
  - grani  $\approx \mu\text{m}$  vengono espulsi radialmente;
  - grani  $\approx \text{cm}$  spiraleggiano verso il Sole.
- I tempi di decadimento per particelle su orbite circolari sono dell'ordine di:

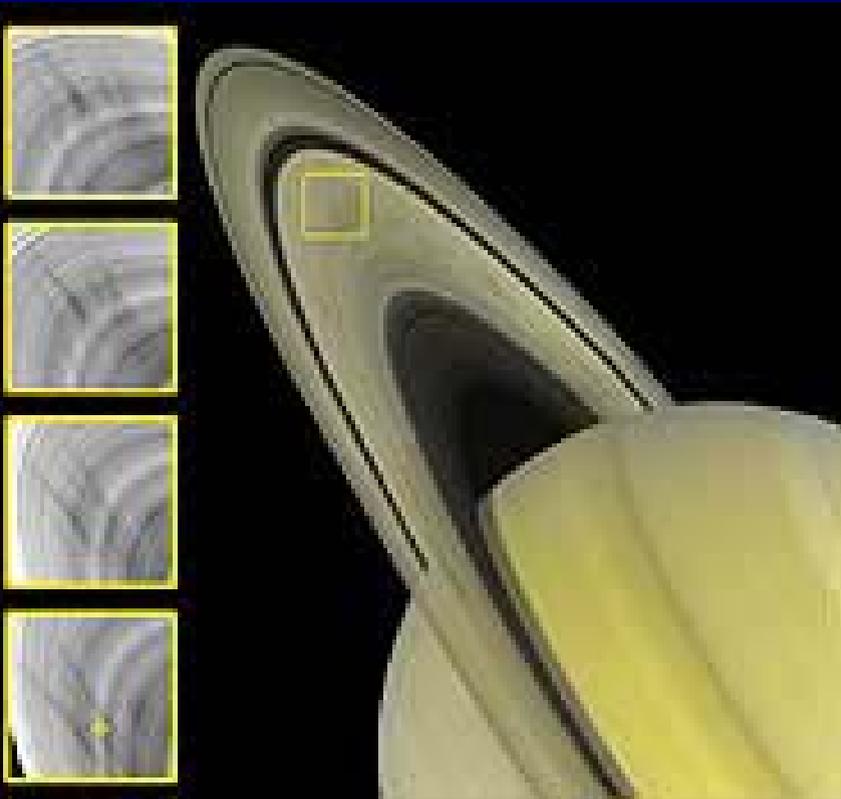
$$t_{decay} = 400 \frac{r_{AU}^2}{\beta} \quad (\text{anni})$$

- Questi processi hanno effetti trascurabili sui grani di polvere diffusi negli anelli di Saturno.

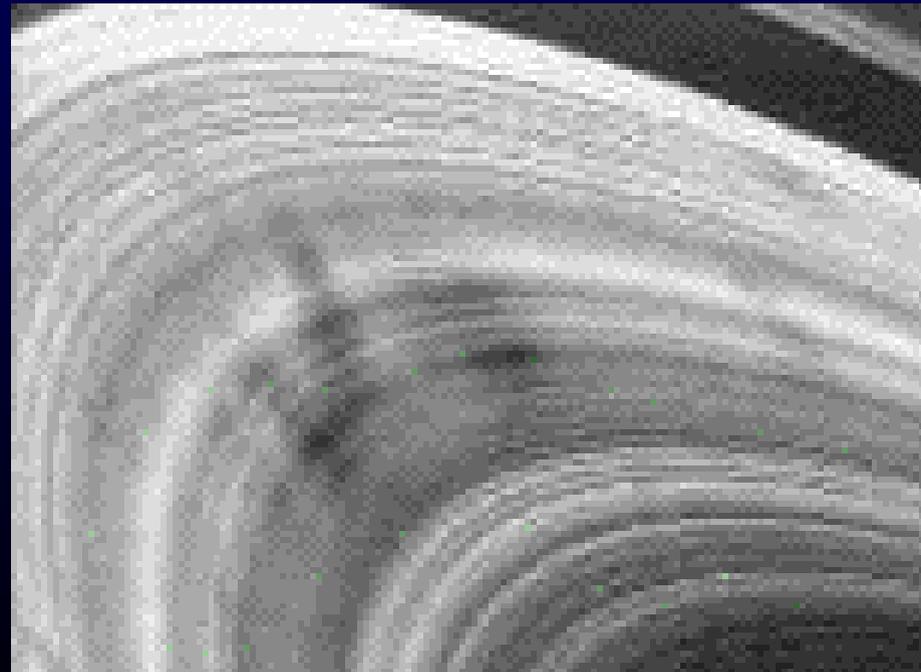
# Interazioni polveri-magnetosfera

- L'interazione delle polveri con il campo magnetico di Saturno genera gli Spokes, strutture disposte radialmente lungo il solo anello B.
- Appaiono in luce visibile più scuri rispetto alle regioni adiacenti in back scattering e più brillanti in forward scattering. Questo implica che sono dovuti ad una distribuzione di particelle di dimensioni dell'ordine del  $\mu\text{m}$ . Particelle di queste dimensioni, caricate negativamente dagli  $e^-$  della magnetosfera, risentono maggiormente delle forze e.m. che di quella gravitazionale.
- Si sono visti formare sull'anello B all'uscita dal cono d'ombra di Saturno e ruotare sull'anello con un periodo di  $640.6 \pm 3.5$  min molto simile ai 639.4 min del periodo di emissione della SKR (Saturn kilometric radiation).
- Molto probabilmente gli spokes si formano in corrispondenza di una anisotropia di dipolo del campo magnetico di Saturno.
- Gli spokes osservati dalle Voyager si formano in pochi minuti e persistono per qualche ora.
- Altre ipotesi sulla loro formazione riguardano il rilascio di polveri e gas ionizzato in seguito all'impatto di meteoroidi sul denso anello B.
- Finora gli strumenti a bordo della Cassini non hanno osservato questi fenomeni.

# Spokes

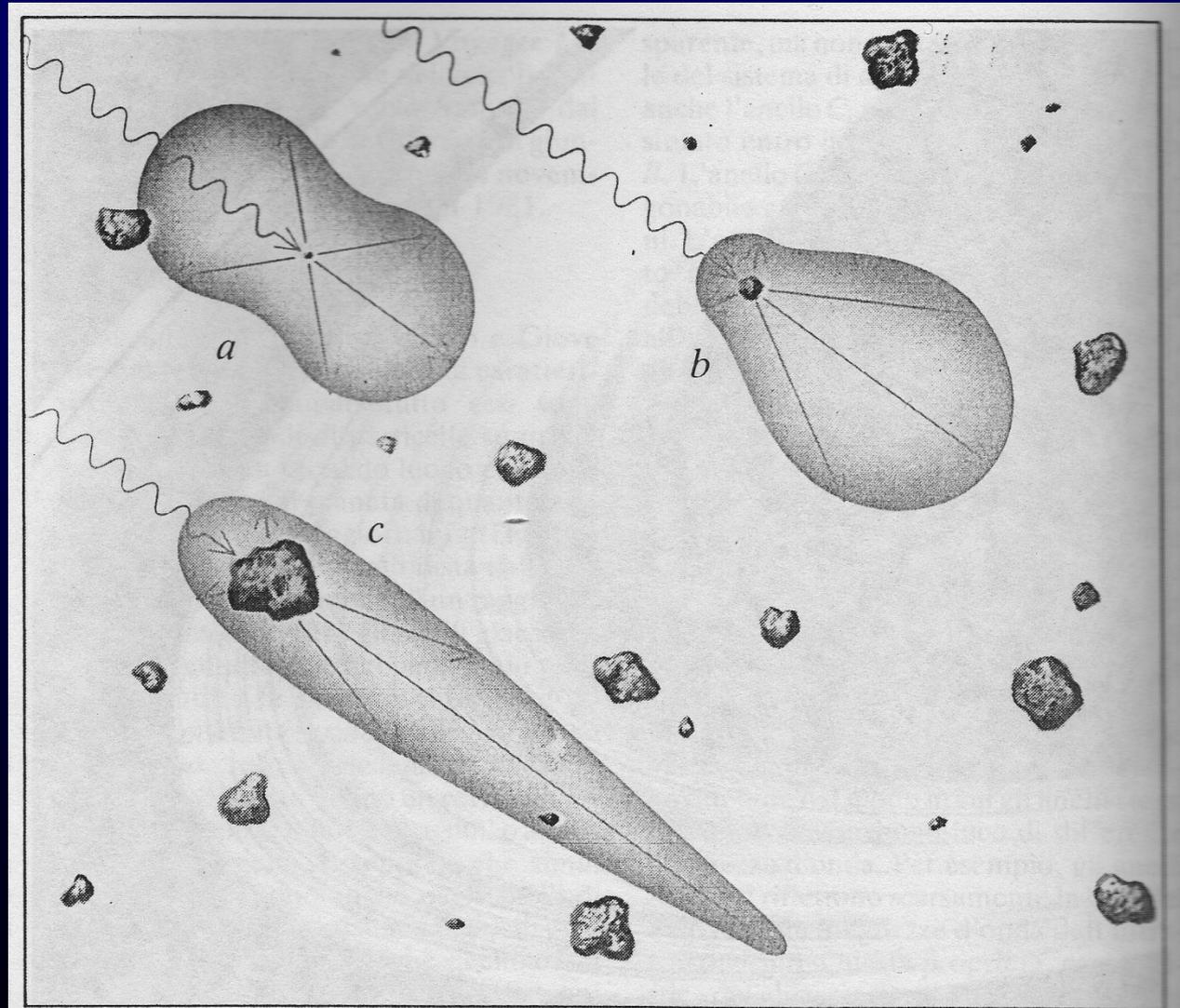


Addensamenti locali di particelle  $D \sim 1 \mu\text{m}$

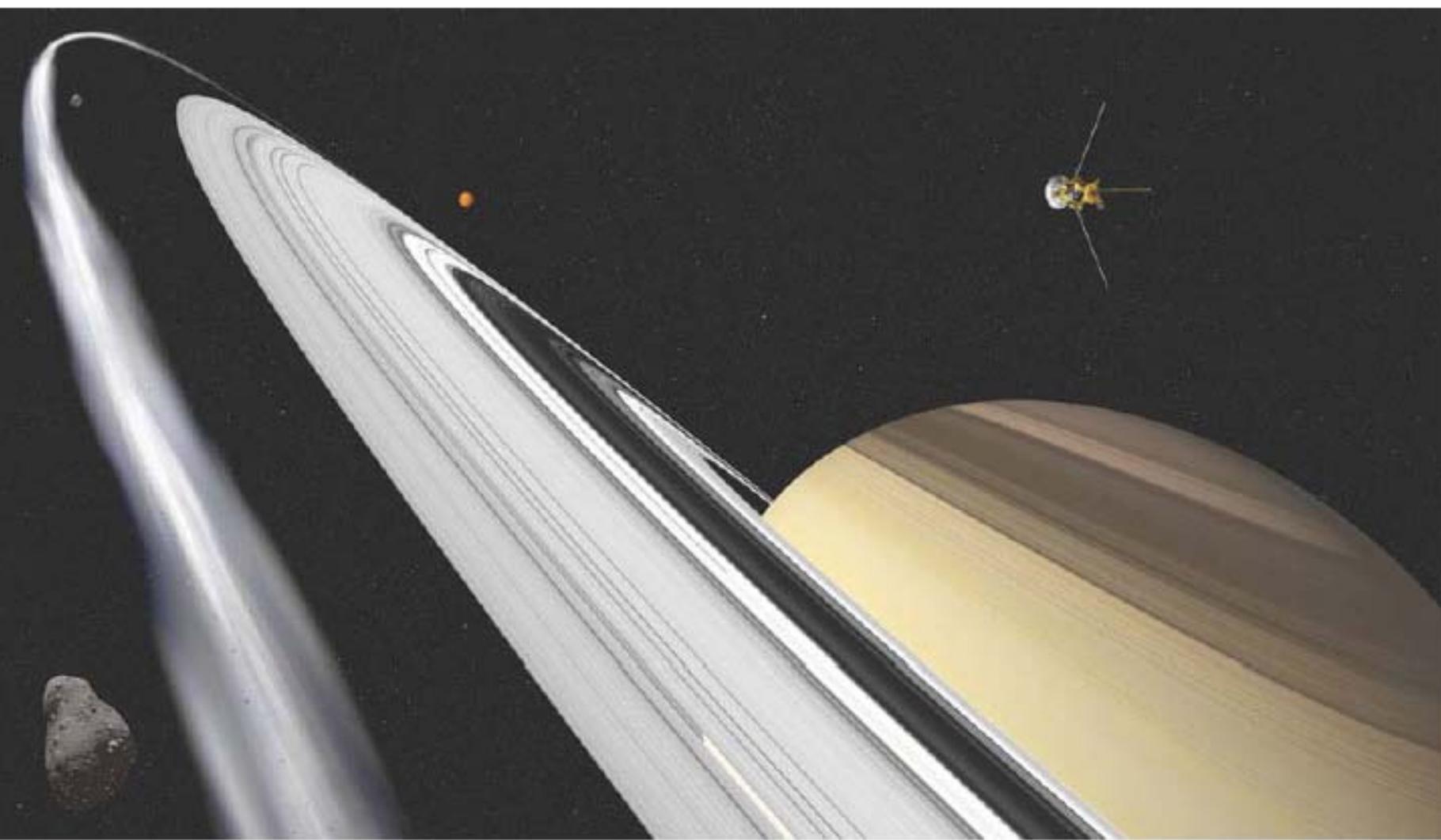


# Scattering

- a) Particella  $D \sim \lambda/10$
- b) Particella  $D \sim \lambda$
- c) Particella  $D > \lambda$



# 7. CASSINI: RISULTATI



# Risultati principali ottenuti dalla missione Cassini (RWG, 2005)

1. Osservazioni degli anelli con la maggiore risoluzione spaziale mai raggiunta finora. In particolare durante la fase di inserzione in orbita di Saturno (7-2004) le camere hanno osservato con grande risoluzione le increspature sugli anelli in corrispondenza delle onde di densità generate dai satelliti. Le misure nel termico hanno dimostrato un basso rate rotazionale delle particelle di ghiaccio e silicati che costituiscono gli anelli. Si è inoltre osservato che al piano orbitale degli anelli è sovrapposta una tenue atmosfera di ossigeno.

2. Interazioni anelli-satelliti ghiacciati: soprattutto l'anello F è enormemente influenzato dall'interazione gravitazionale di Prometeo che gli orbita accanto. In analogia con Pan, scoperto sulle immagini dei Voyager, ed orbitante nella Encke gap, con la Cassini si è scoperto un piccolo satellite nella Keeler gap. Questo satellite è responsabile di fenomeni transienti nelle regioni adiacenti dell'anello A.
3. Dimensioni e densità degli anelli sono state misurate mediante occultazioni stellari nell'UV-VIS-IR-radio. A due lunghezze d'onda su tre le onde radio di Cassini non sono state in grado di penetrare una regione estesa 5000 km dell'anello B e questo ha fatto aumentare la stima dello spessore ottico rispetto alle ipotesi precedenti.

4. VIMS ed UVIS hanno osservato signature spettrali di contaminati sui grani degli anelli: si tratta soprattutto di toline e composti organici concentrati maggiormente sull'anello C, nella divisione di Cassini e nell'anello F.
  5. Le teorie elettrodinamiche esistenti non sembrano essere sufficientemente precise da prevedere la formazione degli spokes; probabilmente esiste un qualche tipo di interazione tra polveri, vento solare e magnetosfera che non è stato ancora considerato.
  6. L'esperimento CDA ha misurato in situ per la prima volta particelle di ghiaccio e silicati provenienti dagli anelli durante gli incontri ravvicinati della Cassini.
-