



UNIVERSITÀ  
DEL SALENTO

# Fare e disfare pianeti e satelliti: guida ragionata alle interazioni mareali

***Francesco De Paolis***

**Le maree possono essere definite come la variazione periodica del livello delle acque del mare e sono un fenomeno noto all'uomo fin dall'antichità.**

Anticamente le maree erano paragonate al respiro del mare o espressione di movimenti della Terra.

Una variante di questa idea individuava nel flusso e riflusso una manifestazione vitale che dimostrava la natura di organismo vivente della Terra.



Possiamo identificare l'ampiezza di marea, mediante il parametro A.

“A” è la differenza tra l'altezza massima del livello del mare (alta marea) e l'altezza minima del livello (raggiunta con la bassa marea)



Località	A
Baia di Fundy (Nuova Scozia, Canada)	20,0 m
Foce del Rio Gallegos (Argentina)	18,0 m
Baia di Frobisher (Canada)	17,4 m
Foce del fiume Severn (Gran Bretagna)	16,3 m
Baia del Mont - Saint - Michel (Francia)	14,7 m
Foce del fiume Fitzroy (Australia)	14,0 m
Saint - Malo (Francia)	13,3 m
Bhaunagar (India)	12,4 m
Foce del Rio Colorado (Messico)	12,3 m



*Bay of Fundy*



*Bay of Frobisher*



*Mont Saint-Michel*



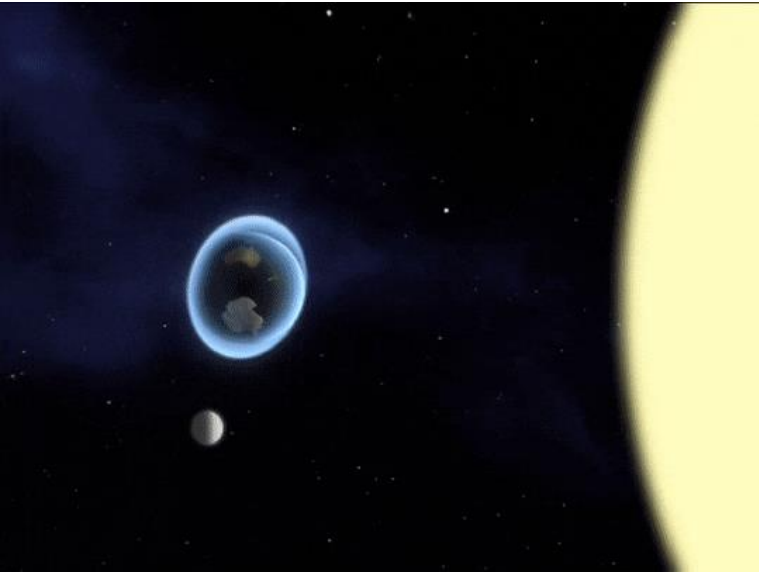
# Galileo e Keplero

- Il primo a comprendere l'influenza della Luna sulle maree pare sia stato Keplero.
- Galileo addirittura criticava questa idea perché non comprendeva come la Luna, così distante dalla Terra, potesse provocare le maree. Sembrava una cosa quasi magica!
- In questo caso Galileo aveva torto mentre Keplero aveva ragione.
- L'idea di Keplero si dimostrò corretta solo quando Newton scoprì la legge di gravitazione universale e spiegò le maree, appunto, come un effetto della forza gravitazionale della Luna.

# Perché avvengono le maree?

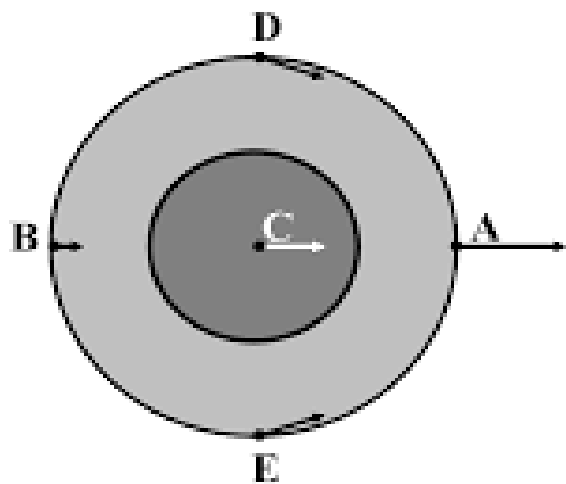
Esse sono la conseguenza dell'interazione tra le molecole d'acqua sulla Terra e i corpi celesti circostanti al pianeta, in primo luogo la Luna.

Le forze di marea non sono un nuovo tipo di forza ma sono una manifestazione della forza di gravità.

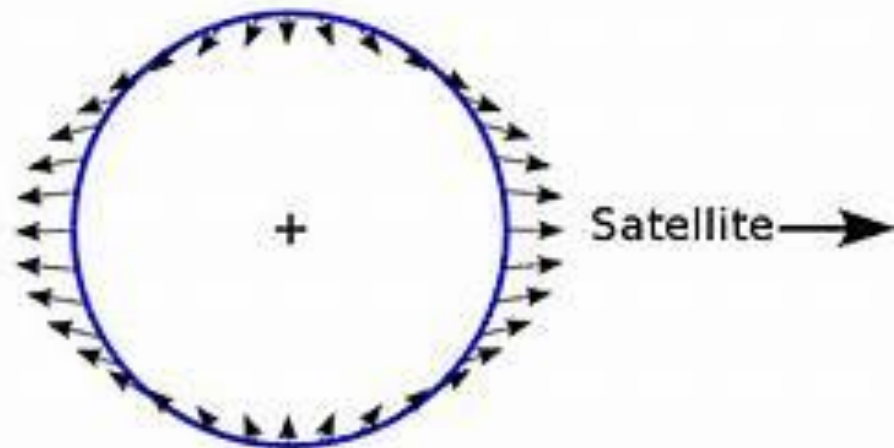


Per semplificare la trattazione trascuriamo (almeno per il momento) sia l'azione del Sole che gli effetti della rotazione terrestre intorno al proprio asse e supponiamo che la superficie solida della Terra, considerata come un corpo perfettamente rigido, sia uniformemente ricoperta da uno strato d'acqua e che quest'ultima abbia la caratteristica di obbedire istantaneamente alla forza gravitazionale della Luna.

# La fisica



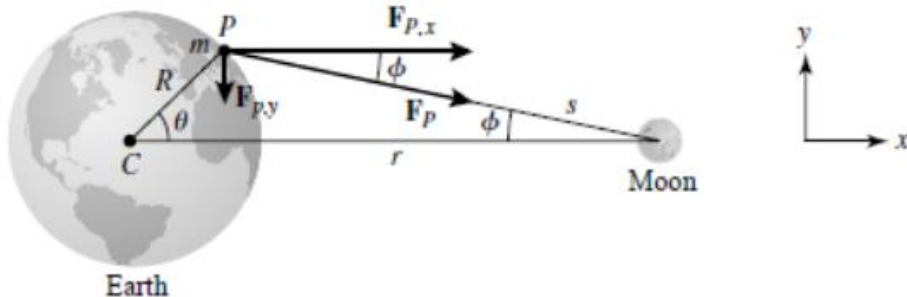
Luna



**La forza di marea è una forza differenziale legata alle dimensioni del corpo che lo subisce. In generale, tra due punti materiali di massa  $m$  a distanza  $dr$  l'uno dall'altro, la forza di marea (tidal force in inglese) generata da un corpo di massa  $M$ .**

Facciamo riferimento alle forze di marea generate dalla Luna sulla Terra:

- Massa luna:  $M$
- Distanza centri Terra-Luna:  $r$
- Masse generiche in P e C:  $m$



Consideriamo, per semplicità, solo le forze agenti nel piano  $x - y$ , con  $\hat{i}$  e  $\hat{j}$  versori verso  $x$  e  $y$ , rispettivamente. In C e P abbiamo quindi

$$F_{C,x} = \frac{GMm}{r^2}, \quad F_{C,y} = 0$$

$$F_{P,x} = \frac{GMm}{s^2} \cos \phi, \quad F_{P,y} = -\frac{GMm}{s^2} \sin \phi$$

Conviene prima scrivere  $s=f(r,R,\theta)$ :

$$s^2 = (r - R \cos \theta)^2 + (R \sin \theta)^2 = r^2 \left( 1 - 2 \frac{R}{r} \cos \theta + \frac{R^2}{r^2} \right) \simeq r^2 \left( 1 - 2 \frac{R}{r} \cos \theta \right)$$

Trascurando il termine  $(R/r)^2$  avremo che la Tidal Force ( $F_t$ ) sarà uguale a:

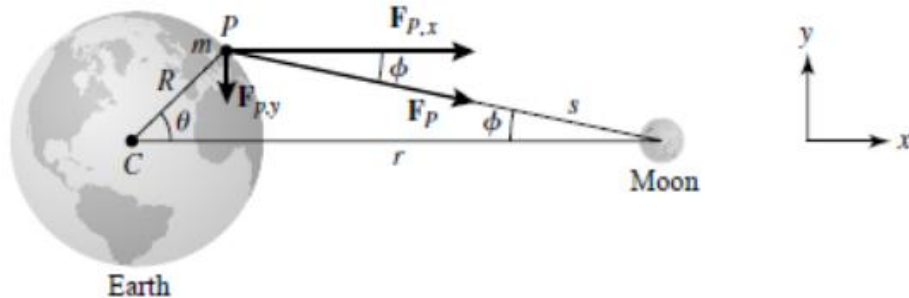
$$\mathbf{F}_t = \frac{GMm}{r^2} \left( \cos \phi \left( 1 + 2 \frac{R}{r} \cos \theta \right) - 1 \right) \hat{\mathbf{i}} - \frac{GMm}{r^2} \left( 1 + 2 \frac{R}{r} \cos \theta \right) \sin \phi \hat{\mathbf{j}}$$

Notiamo ora che  $\phi \simeq 0$  e  $r \sin \phi \simeq R \sin \theta$ , possiamo riscrivere l'eq. precedente in:

$$\mathbf{F}_t \simeq \frac{GMm}{r^2} \left( 1 + 2 \frac{R}{r} \cos \theta - 1 \right) \hat{\mathbf{i}} - \frac{GMm}{r^2} \left( 1 + 2 \frac{R}{r} \cos \theta \right) \sin \phi \hat{\mathbf{j}}$$

Oppure ancora:

$$\mathbf{F}_t \simeq \frac{GMmR}{r^3} \left( 2 \cos \theta \hat{\mathbf{i}} - \sin \theta \hat{\mathbf{j}} \right)$$



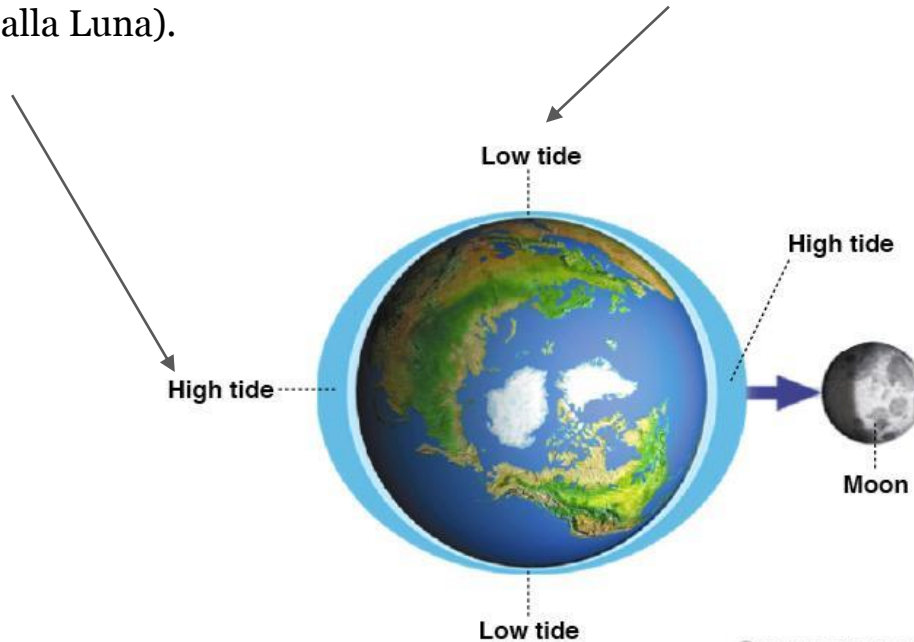


$$\mathbf{F}_t \simeq \frac{GMmR}{r^3} (2 \cos \theta \hat{\mathbf{i}} - \sin \theta \hat{\mathbf{j}})$$

Quindi, abbiamo alta marea se:

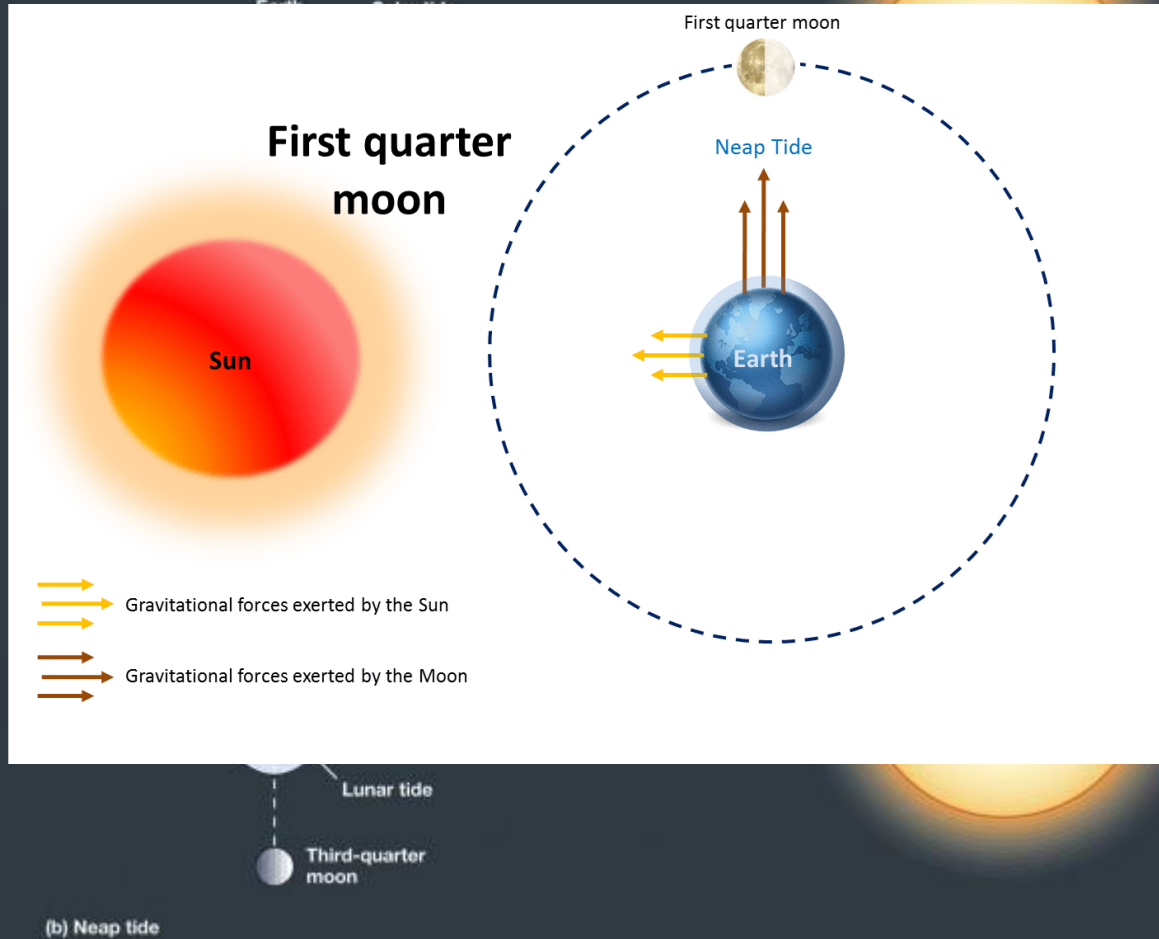
- $\theta=0$ , lungo la congiungente Terra-Luna, si ha:  $F_t=2GMmR/r^3$  (diretta verso la Luna)
- $\theta=\pi$  si ha:  $F_t=-2GMmR/r^3$  (diretta dalla parte opposta rispetto alla Luna).

Nel caso in cui  $\theta=\pi/2$  si ha invece uno schiacciamento (bassa marea) dato che  $F_t = -GMmR/r^3$ .



Nel caso in cui la Luna sia allineata al Sole (come nel caso di un plenilunio o novilunio), si ha una **marea sizigiale** (spring tide o "King Tide") e, come conseguenza, l'escursione tra alta e bassa marea è massima.

Si parla invece di **marea di quadratura** (neap tide), sette giorni dopo una marea sizigiale, quando tra il Sole e la Luna vi è un angolo retto, e la differenza tra bassa e alta marea è minima.



# Alcune conseguenze delle forze di marea

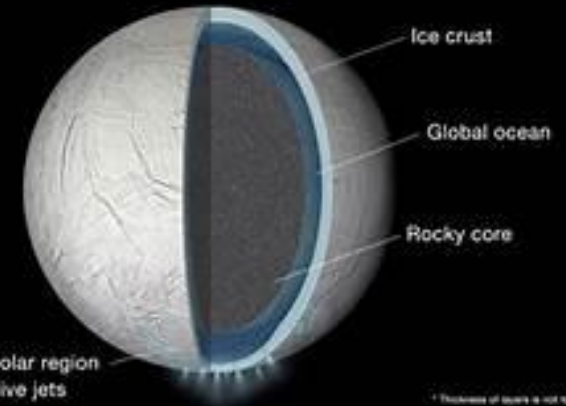
## Riscaldamento, terremoti ed eruzioni vulcaniche

**Le forze di marea provocate da Giove sui suoi satelliti (Io, Europa, Ganimede, ...) e da Saturno in particolare su Titano ed Encelado sono così intense che possono provocare maree alte anche 100 metri (ad esempio su Io).**

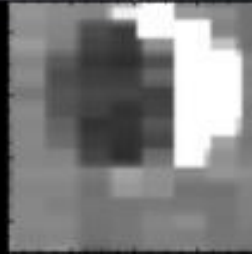
**Europa e Titano hanno grandi oceani di acqua liquida sotto lo strato ghiacciato.**

**Encelado:** il montaggio delle immagini della missione Cassini mostra, per la prima volta, come i geyser di Encelado varino periodicamente in funzione dell'attrazione gravitazionale di Saturno.

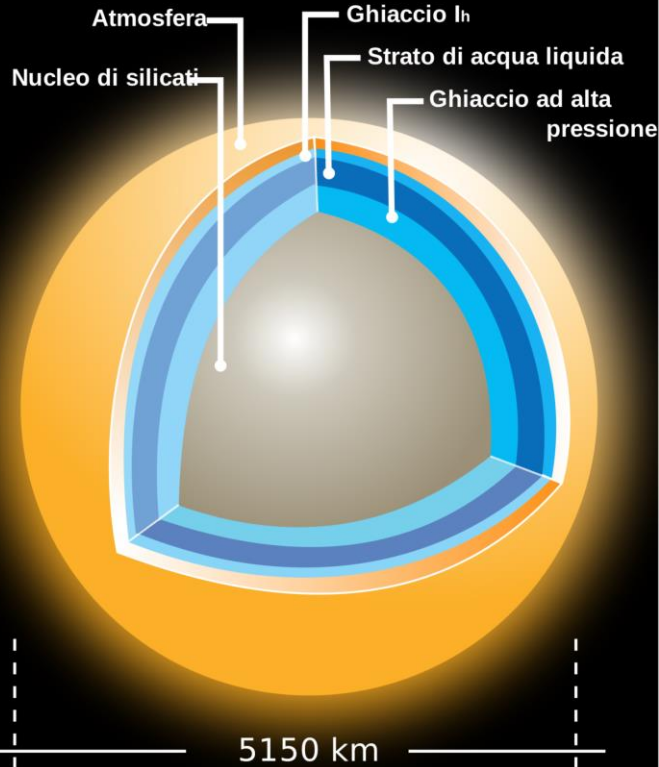
Global Ocean on Saturn's Moon ENCELADUS



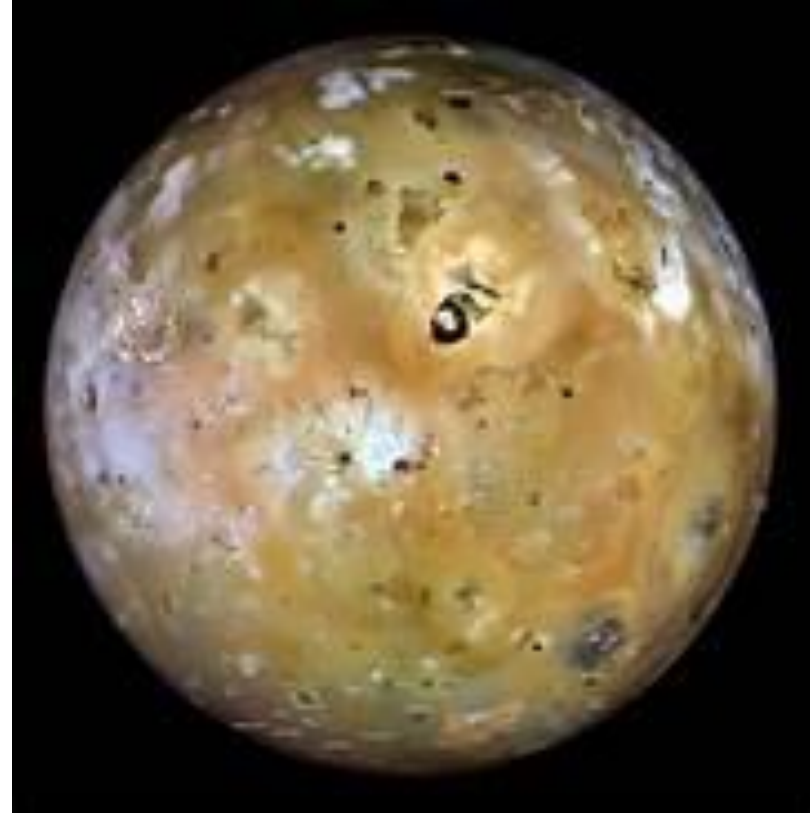
\* Thickness of ocean is NOT TO SCALE



**Titano:** satellite scaldato dalle forze di marea provocate da Saturno che rendono possibile l'esistenza di acqua allo stato liquido sotto la superficie ghiacciata.



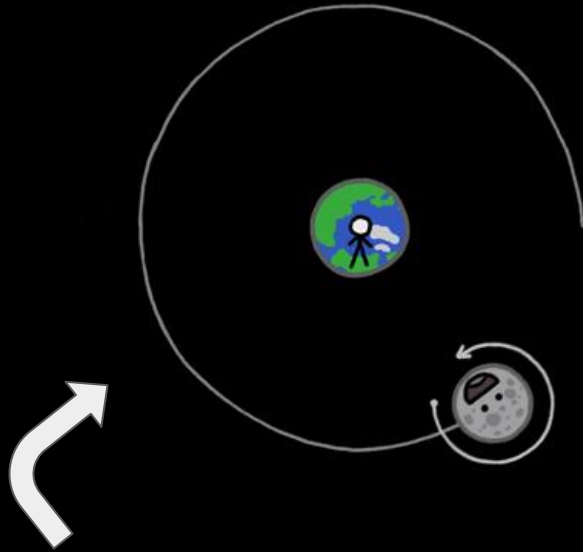
**Io:** maree crostali alte anche 100 metri e intenso vulcanismo (che ne modifica continuamente l'aspetto superficiale) provocato dalle forze mareali.



Un effetto particolare causato dalle forze di marea è la **rotazione sincrona** (**tidal locking**)

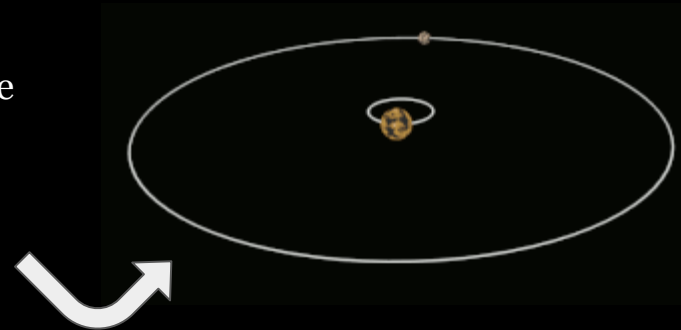
Un corpo orbitante si dice in rotazione sincrona quando il suo periodo di rotazione è uguale al suo periodo di rivoluzione

La **rotazione sincrona** avviene quando oggetti astronomici orbitano uno molto vicino all'altro e l'attrazione gravitazionale tra i due genera forze di marea su entrambi distorcendone la forma



Alcuni esempi di rotazione sincrona sono la Luna che ruota intorno alla Terra

Oppure Caronte che orbita intorno a Plutone costituendo quasi un vero e proprio sistema binario



**Tidal locking**: perché vediamo sempre la stessa faccia della Luna



Minute  
Earth

**In alcuni casi le forze di marea possono persino distruggere un oggetto, in genere un pianeta o una stella, che viene a trovarsi sufficientemente vicino ad un altro (più massiccio), dando luogo ad un evento denominato:**

# Tidal Disruption Event

ILLUSTRATION



OPTICAL



X-RAY



# Simulation of a TDE

Consideriamo ora un oggetto di massa  $m$  e raggio  $R$  che passi a distanza  $r$  da un corpo di massa  $M$  (con  $M > m$ ). L'accelerazione mareale (forza mareale per unità di massa) indotta su  $m$  è:

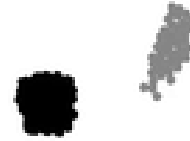
$$a_t \simeq \frac{2GMR}{r^3}$$

mentre l'accelerazione gravitazionale che tiene assieme l'oggetto di massa  $m$  è  $a=Gm/R^2$ .

Se  $a_t > a$  allora le forze di marea rompono l'oggetto di massa  $m$  e questa condizione definisce il cosiddetto raggio di distruzione mareale, o **raggio di Roche**, dato da:

$$r_t = \left( \frac{2M}{m} \right)^{1/3} R$$

top view

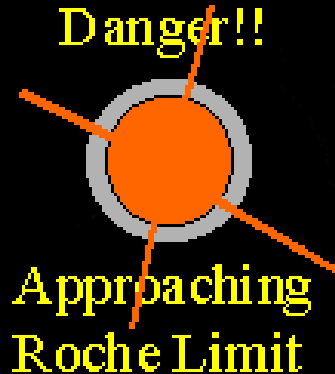
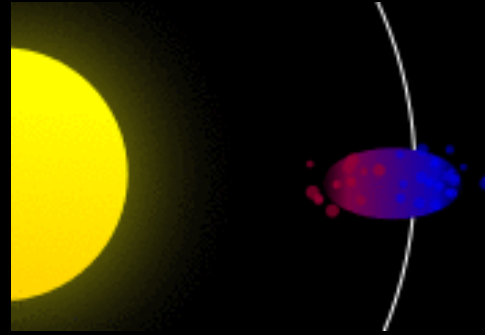


side view



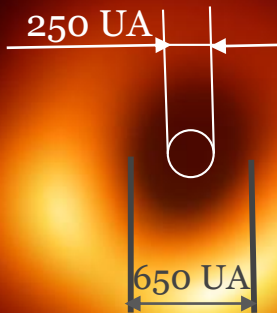
MakeAGIF.com

Vale a dire che se i due oggetti si trovano ad una distanza minore o uguale al raggio di Roche le forze di marea provocheranno la **distruzione** del corpo di massa **m**

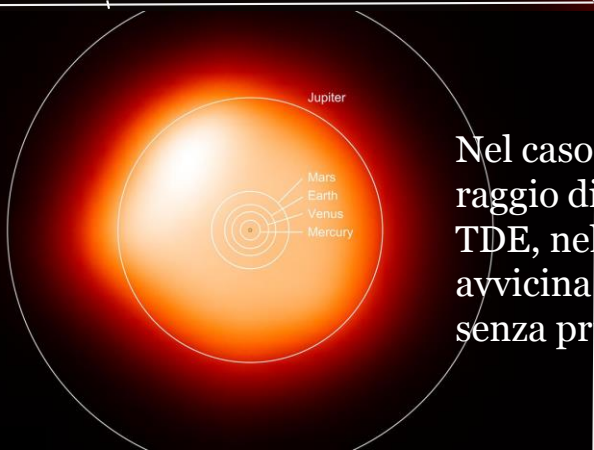


Spesso, quando il corpo di massa  $m$  si rompe, succede che approssimativamente  $m/2$  cada sul corpo maggiore mentre l'altra metà sia spinta verso lo spazio esterno

*Betelgeuse*



4380 UA



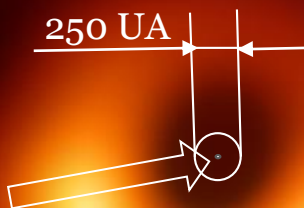
Nel caso in cui il raggio di Roche sia superiore al raggio di Schwarzschild ( $r_t > r_s$ ) può verificarsi un TDE, nel caso contrario ( $r_t < r_s$ ), se il corpo si avvicina troppo al buco nero, verrà solo inghiottito senza prima essere spezzato o distrutto

*M87 (Black Hole)*

Se prendiamo come riferimento sempre BH M87, possiamo calcolare il raggio di Roche medio per diversi corpi celesti di vario tipo. Conoscendo la massa  $M$  del buco nero ( $1,31 \cdot 10^{40}$  kg) possiamo ricavare  $r_t$ , ponendo al posto di  $m$  e  $R$  i valori di massa e raggio medi per ogni classe di stella presa in considerazione

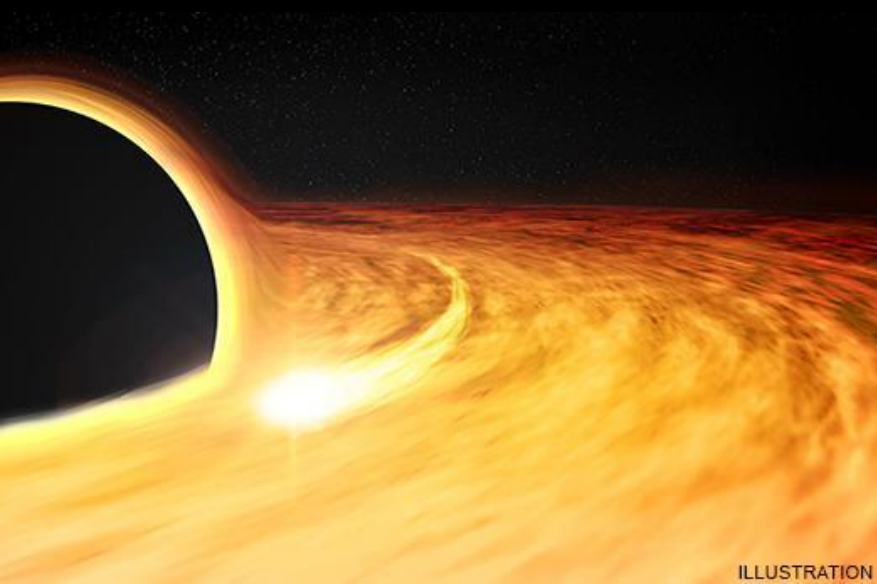
Raggio di Roche se:

- Stella di neutroni,  $r_t=20631$  km
- Nana bianca,  $r_t=0,19$  UA
- Stella come il Sole,  $r_t=10,99$  UA
- Gigante rossa media,  $r_t=4155$  UA
- Supergigante rossa media,  $r_t=4860$  UA
- Ipergigante rossa,  $r_t=5985$  UA

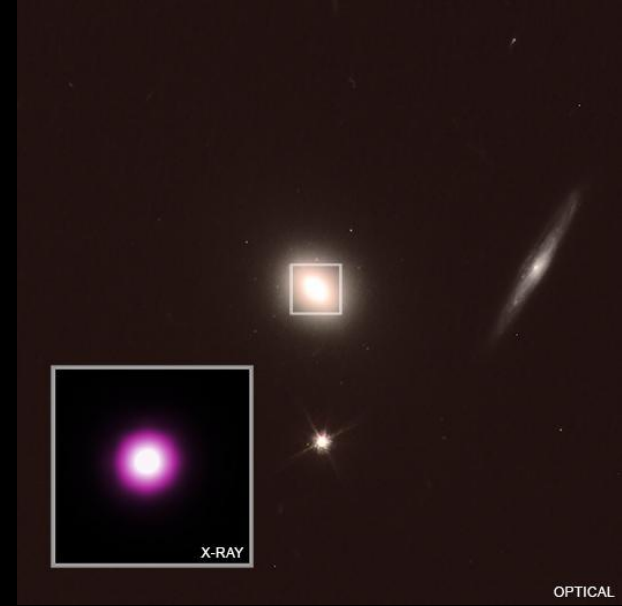


M87 (Black Hole)

In una galassia lontana circa  $2,9 \cdot 10^8$  al (PGC 043234), una stella è andata troppo vicino al buco nero centrale ed è stata distrutta, portando i resti stellari in orbita attorno al buco nero. L'evento di distruzione mareale è stato denominato ASASSN-14li.



ILLUSTRATION



La particolarità di quest'evento è che, mediante osservazioni nei raggi X, è stata misurata con particolare accuratezza la velocità di rotazione (spin) del buco nero, ricavando che esso ruotava a circa metà della velocità della luce.

## Come si riconosce una TDE?

Tenendo conto che se i due corpi (in questo caso pianeta-stella) costituiscono un sistema binario e  $m \ll M$ , dalla terza legge di Keplero  $r^3/P^2 = GM/4\pi^2$ , posto un tempo  $P=t$ , possiamo notare che il raggio di Roche è proporzionale a  $t^{2/3}$ .

$$r = \left( \frac{GM}{4\pi^2} t^2 \right)^{1/3} \propto t^{2/3}$$

Considerando poi l'energia specifica che invece è inversamente proporzionale a  $t^{2/3}$  si avrà:

$$e = \frac{E}{m} = -\frac{GM}{2r} \propto t^{-2/3}$$

Si ottiene quindi che  $dm/dt$  è proporzionale a  $t^{-5/3}$  sempre supponendo costante  $dm/de$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dm}{de} \frac{de}{dt} \propto t^{-5/3}$$

**La luminosità  $L$  emessa per accrescimento, in genere osservabile nella banda dei raggi X, sarà allora approssimabile con la relazione**

$$L \simeq \frac{GM\dot{m}}{R} \propto t^{-5/3}$$

**I casi di TDE principalmente osservati sono quelli relativi ad una stella che viene distrutta da un buco nero, perché più frequenti e più semplici da individuare.**

**Ci sono comunque dei casi osservati di pianeti distrutti da stelle di neutroni o nane bianche come nel caso dell'evento IGR J17361-4441, una sorgente di raggi X vicino al centro dell'ammasso globulare NGC 6388, scoperto nell'Agosto 2011.**



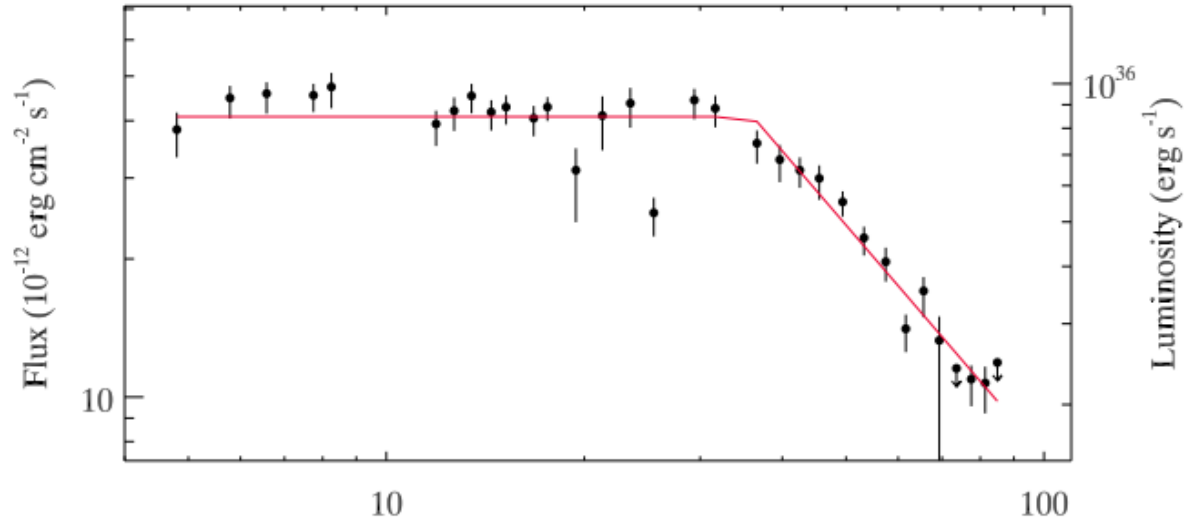
*NGC 6388*

# **IGR J17361-4441: a planetary tidal disruption event by a white dwarf in NGC 6388**

**Del Santo, Nucita, Lodato,  
Manni, De Paolis, Farihi,  
De Cesare, Segreto,  
Monthly Notices of the Royal  
Astronomical Society, 444, 93  
(2014).**







Questo TDE è dovuto ad un pianeta con massa circa  $\frac{1}{3}$  della Terra che viene distrutto da una nana bianca con massa molto vicina al limite di Chandrasekhar.

Come visto precedentemente, il tasso di accrescimento di massa del corpo più grande, così come la luminosità sono proporzionali a  $t^{5/3}$ . Possiamo notare dal grafico (in scala bilogarithmica) come la retta formi un ginocchio e cambi pendenza, approssimabile proprio ad un'esponenziale di esponente  $-5/3$ . IGR J17361-4441 è uno dei TDE meglio osservati e campionati.

# INAF (Istituto Nazionale di Astrofisica) News, 22 luglio 2014



# Conclusioni....sperimentali



## 3 esperimenti con la slinky

(quale dei tre è legato direttamente alle forze di marea?)

