



ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA – OSSERVATORIO ASTROFISICO DI TORINO

# IL SISTEMA TERRA-LUNA

CORSO DI FORMAZIONE DI ASTRONOMIA E ASTROFISICA

PER DOCENTI DI SCUOLA SECONDARIA

ANNO 2019-2020 - CICLO 1

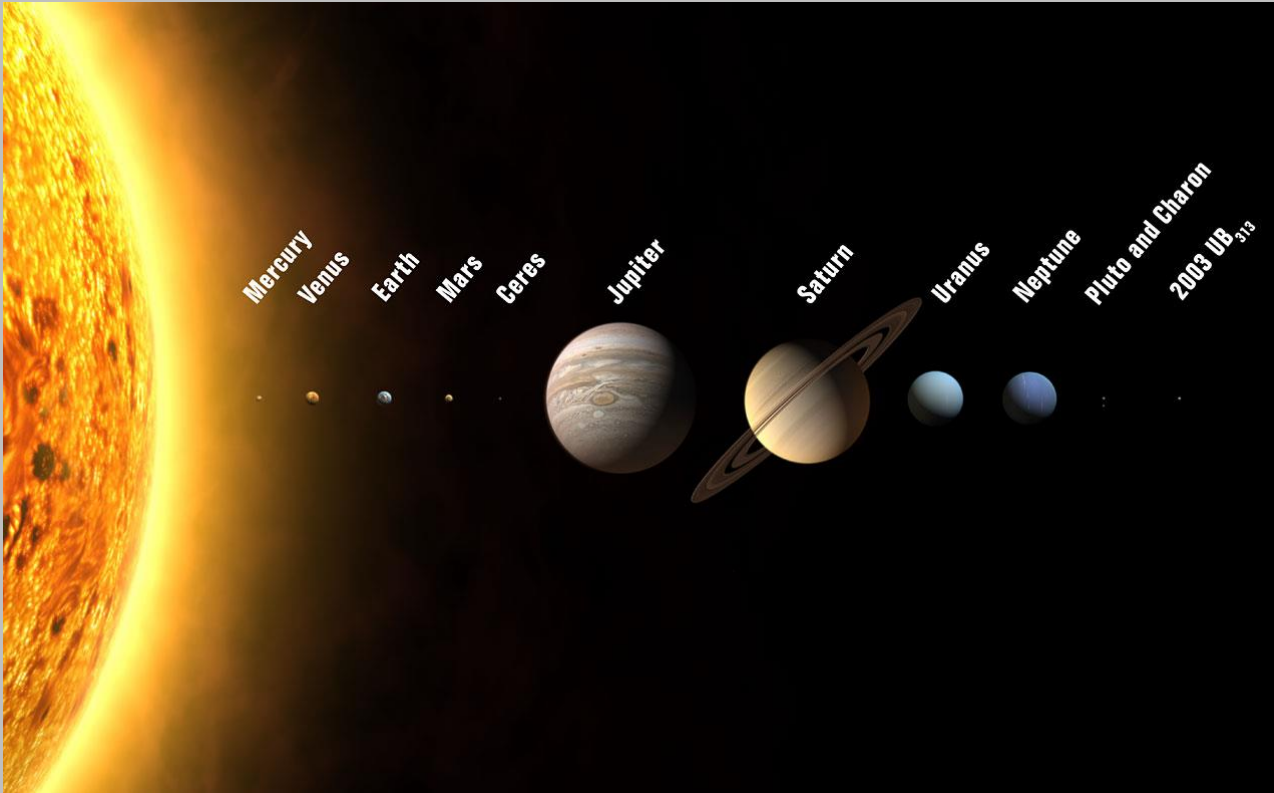




# INDICE DEGLI ARGOMENTI TRATTATI

- Generalità sul Sistema Solare
- Formazione della Luna
- Morfologia e struttura interna della Luna
- Influsso della Luna sulla Terra
- Missioni lunari

# GENERALITÀ SUL SISTEMA SOLARE

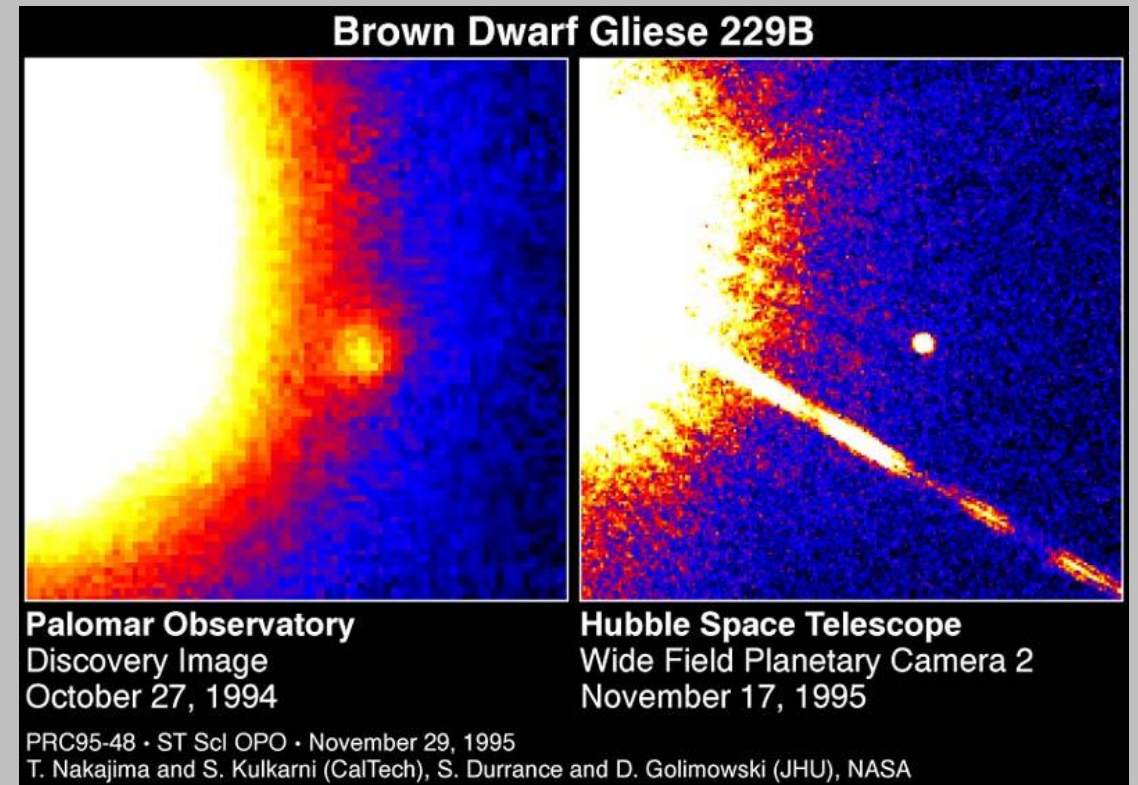


- Sole
- 8 Pianeti
- 5 Pianeti nani
- 205 satelliti naturali dei pianeti
- 9 satelliti dei pianeti nani
- Asteroidi della fascia principale
- Asteroidi della fascia di Edgeworth-Kuiper
- Oggetti del disco diffuso
- Comete
- Nube di Oort
- Mezzo interplanetario

# NANE BRUNE E PIANETI

## Distinzione tra pianeta e stella

- $M_{\text{lim}} \sim 0.080 M_{\odot} = 80 M_{\text{giove}}$ : massa limite per le reazioni di fusione nucleare di  $^1\text{H}$  in  $^4\text{He}$ .
- $M_{\text{lim}} \sim 0.013 M_{\odot} = 13 M_{\text{giove}}$ : limite minimo per le reazioni di fusione nucleare del deuterio  $^2\text{H}$  in  $^3\text{He}$ .
- Nana Bruna: se la massa cade nell'intervallo  $0.013 \div 0.080 M_{\odot}$ .
- **Pianeta**: se la massa è **< di  $0.013 M_{\odot}$** .



Gliese 229B =  $40 M_{\text{giove}}$

# DEFINIZIONE DI PIANETA

## ➤ La Risoluzione B5 della IAU

### Definizione di Pianeta

E' un corpo celeste che:

- a. è in orbita attorno al Sole;
- b. ha una massa sufficiente da permettere alla sua gravità di vincere le forze di corpo rigido e assumere una forma di equilibrio idrostatico (quasi sferica);
- c. ha ripulito le vicinanze intorno alla sua orbita.

### Definizione di Pianeta nano

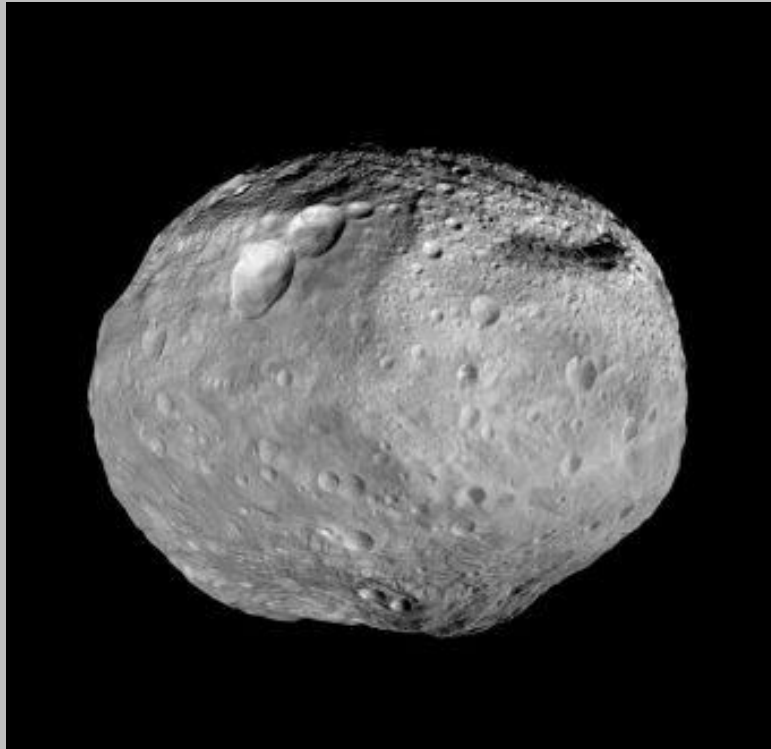
E' un corpo celeste che soddisfa le condizioni *a.* e *b.* ma:

- c. **non ha ripulito** le vicinanze intorno alla sua orbita;
- d. **non è un satellite**.

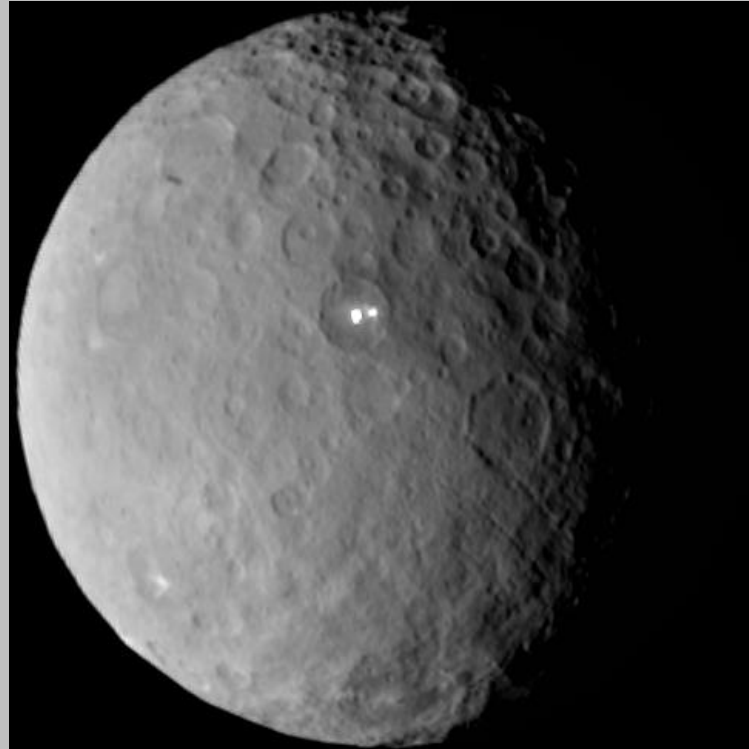
### IAU B5 RESOLUTION

Tutti gli altri corpi (asteroidi, comete), ad eccezione dei satelliti, sono definiti come **‘Piccoli corpi del Sistema solare’** o **‘Corpi minori del sistema solare’**.

## ESEMPIO DI CORPO MINORE E PIANETA NANO



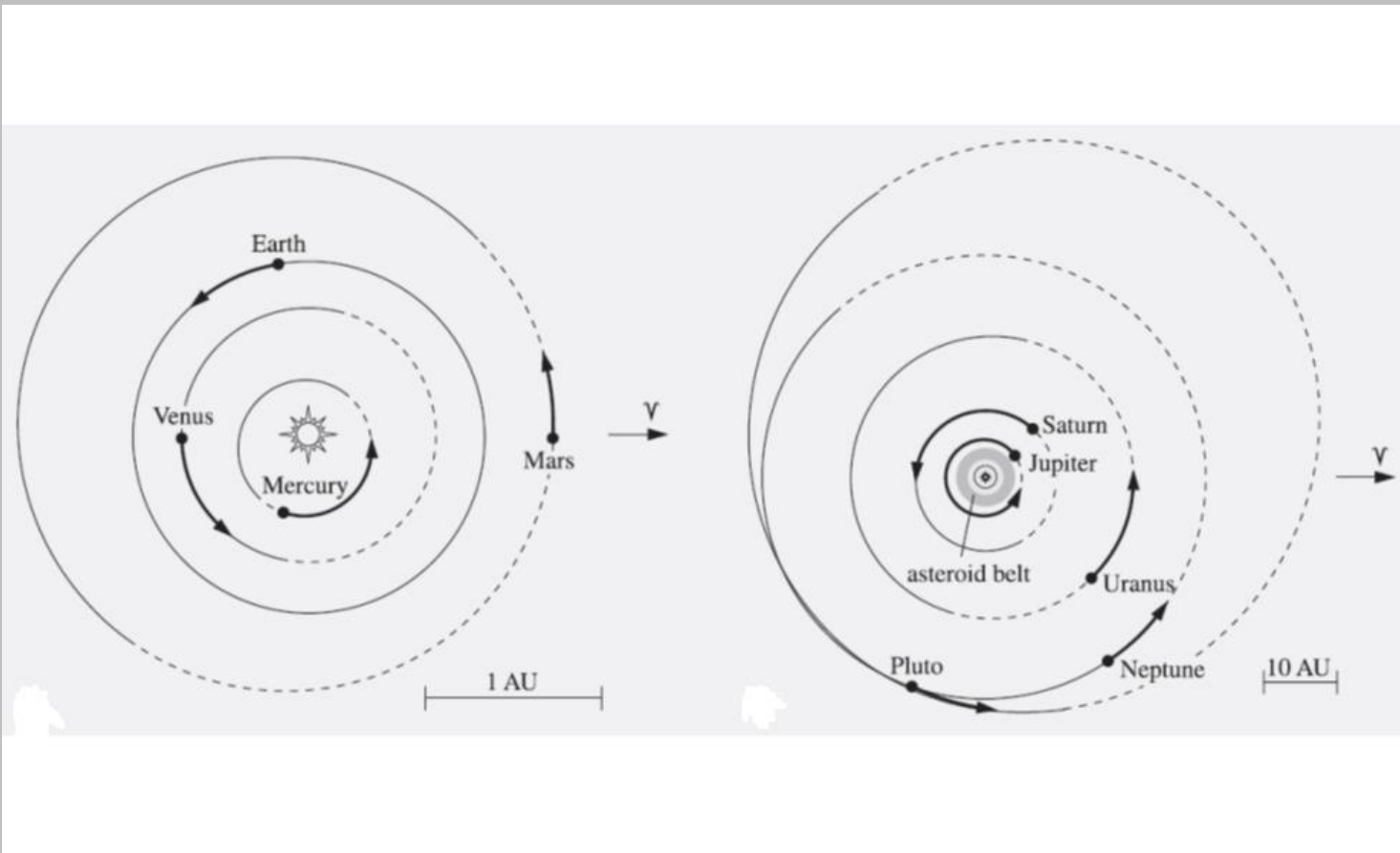
Vesta



Cerere

- Vesta e Cerere si trovano entrambi nella fascia principale degli asteroidi.
- Non possono essere classificati come pianeti secondo la risoluzione B5 perché non rispettano la condizione c.
- Vesta è classificato come corpo minore in quanto non sferico.
- Cerere è sferico, dunque è classificato come pianeta nano.

# PIANETI INTERNI ED ESTERNI



Pianeti rocciosi

Pianeti gassosi  
+ Pianeta nano (Plutone)

	Distanza U.A.
Mercurio	0.387
Venere	0.723
Terra	1.000
Marte	1.523
Giove	5.203
Saturno	9.537
Urano	19.191
Nettuno	30.068

1 AU = 149'600'000 km



# I 5 PIANETI NANI

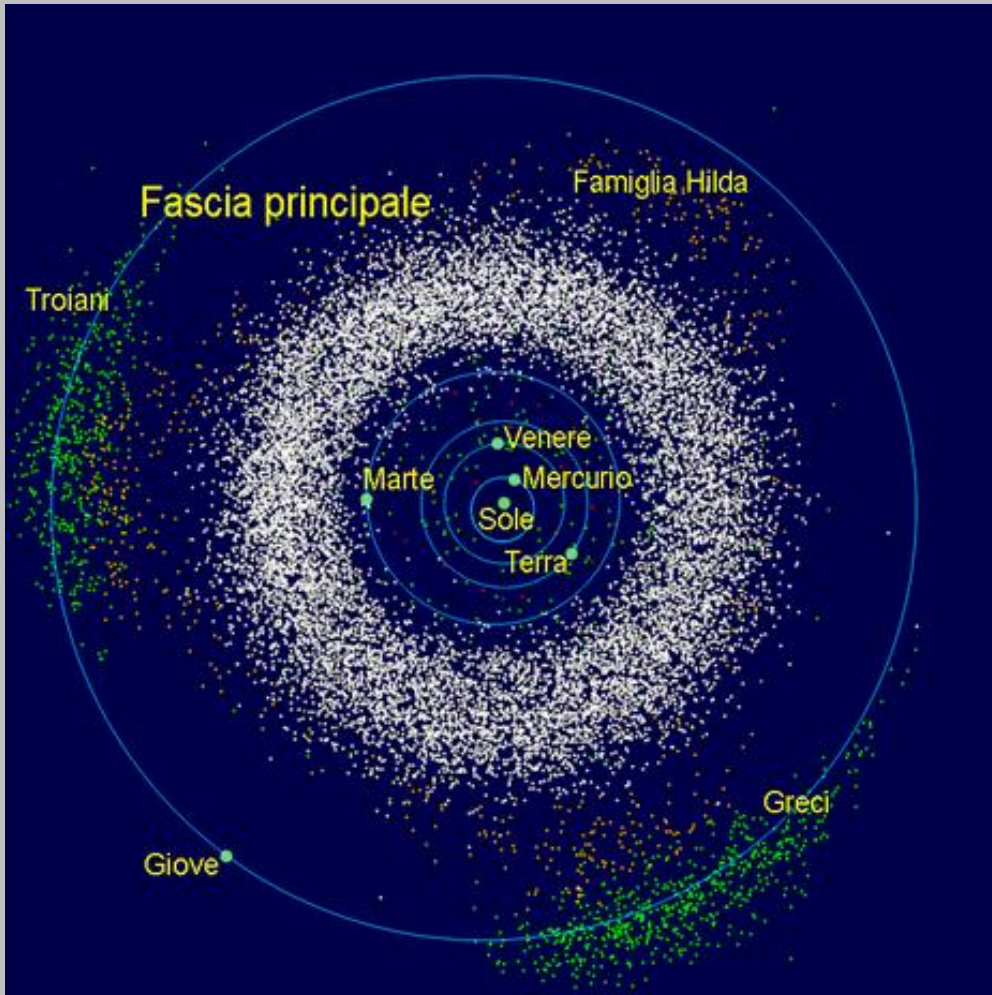


	Distanza U.A.
Mercurio	0.387
Venere	0.723
Terra	1.000
Marte	1.523
Cerere	2.765
Giove	5.203
Saturno	9.537
Urano	19.191
Nettuno	30.068
Plutone	39.482
Haumea	43.218
Makemake	45.561
Eris	67.781

1 AU = 149'600'000 km



# CORPI MINORI – FASCIA PRINCIPALE DEGLI ASTEROIDI



- 796'926 oggetti catalogati (al 15 settembre 2019)
- Dimensioni variabili da 530 km a 10 m.
- Forma irregolare.
- La massa totale di tutti gli asteroidi della fascia principale è inferiore a quella della Luna.

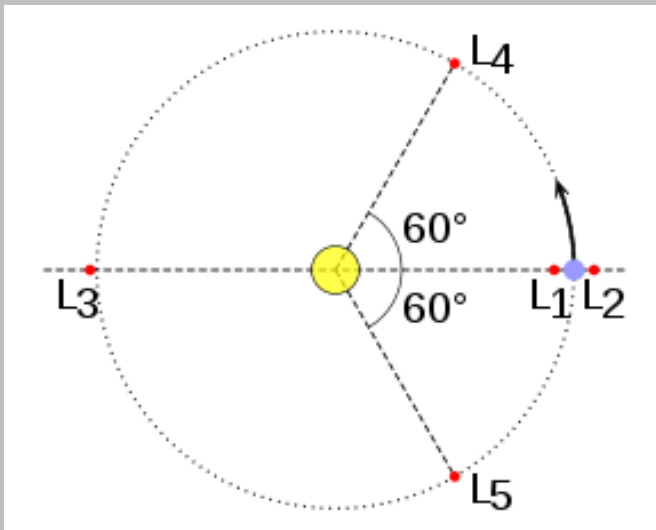


243 Ida e il suo satellite Dactyl

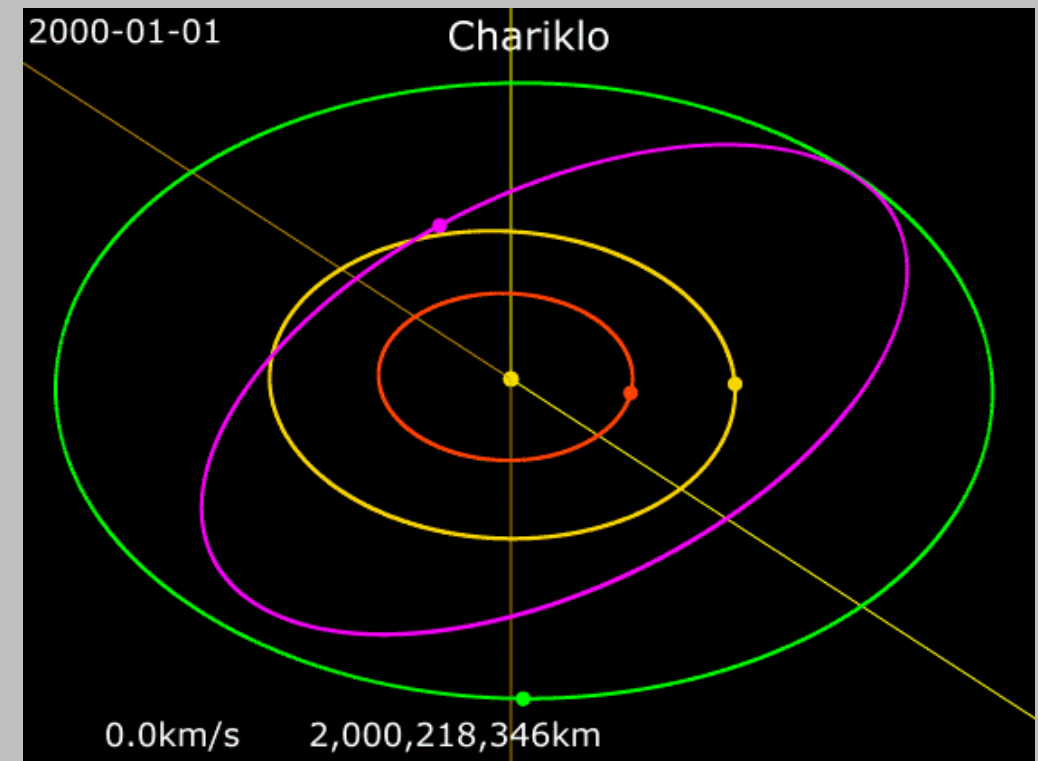
## CORPI MINORI - OLTRE GIOVE

### Troiani di:

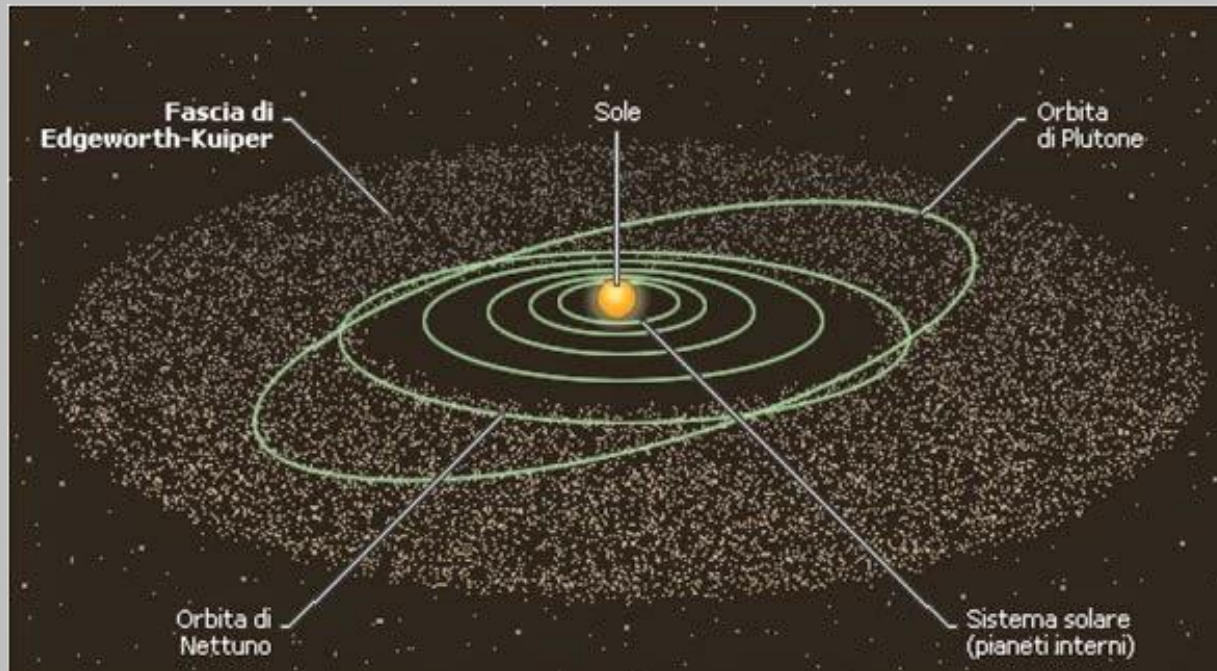
- **Giove** = 7000 catalogati ( $10^6$  stimati).
- **Saturno** = nessuno (tutti interni al sistema, cioè sono troiani di un satellite di Saturno).
- **Urano** = 2
- **Nettuno**: 22



**Centauroi:** asteroidi compresi tra le orbite di Giove e Nettuno.



# FASCIA DI EDGEWORTH-KUIPER E GLI SDO



**TNO - 30 ÷ 50 U.A.**

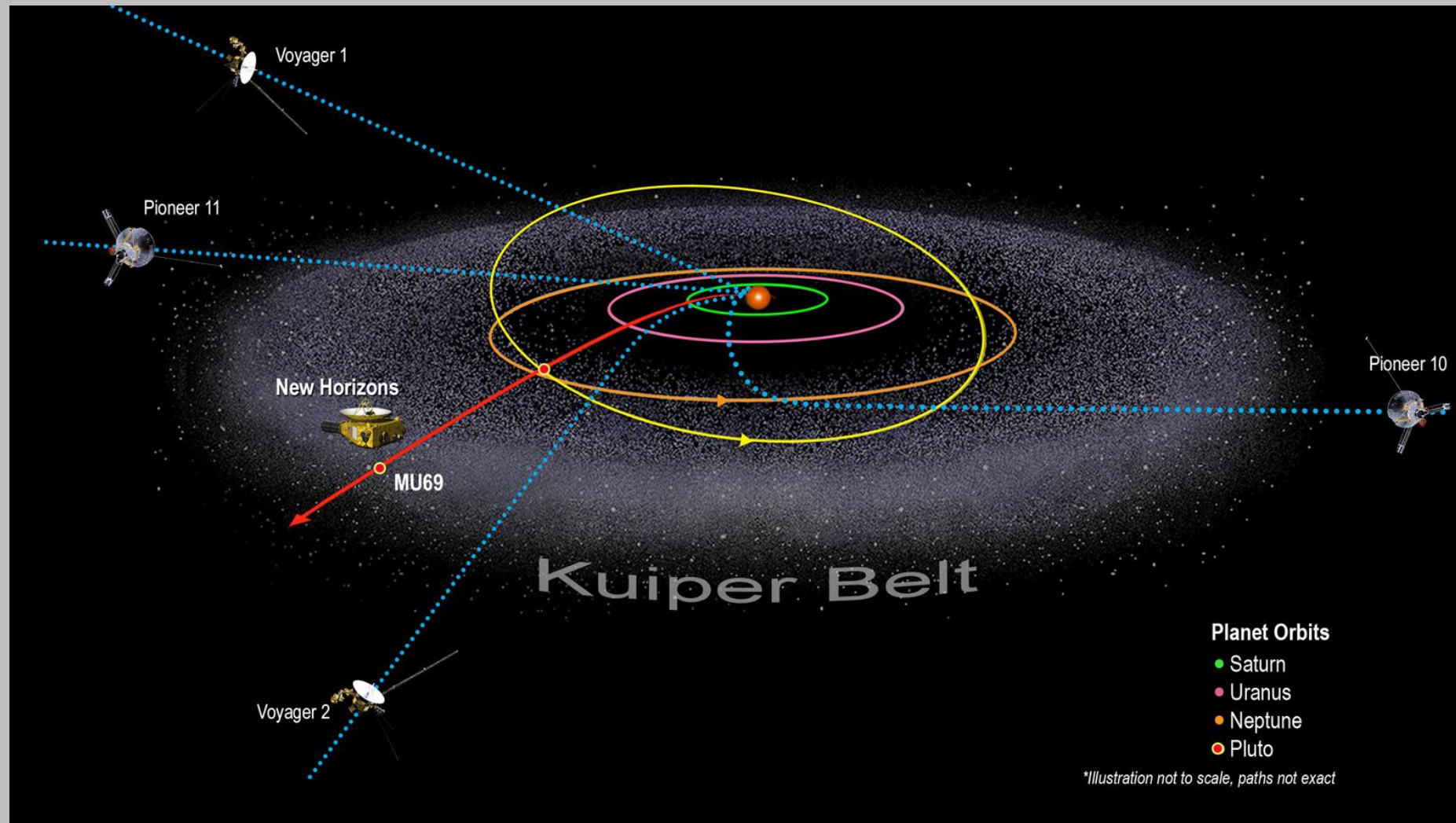
- TNO (Trans Neptunian Objects): > 30 U.A.
  - Fascia di Edgeworth-Kuiper (KBO)
    - Cubewani: bassa eccentricità, non in risonanza (Haumea, Makemake).
    - Plutini: in risonanza orbitale 2:3 con Nettuno (Plutone, Orcus).
    - Twotini: in risonanza orbitale 1:2 con Nettuno.

## ➤ SDO (Scattered Disc Objects).

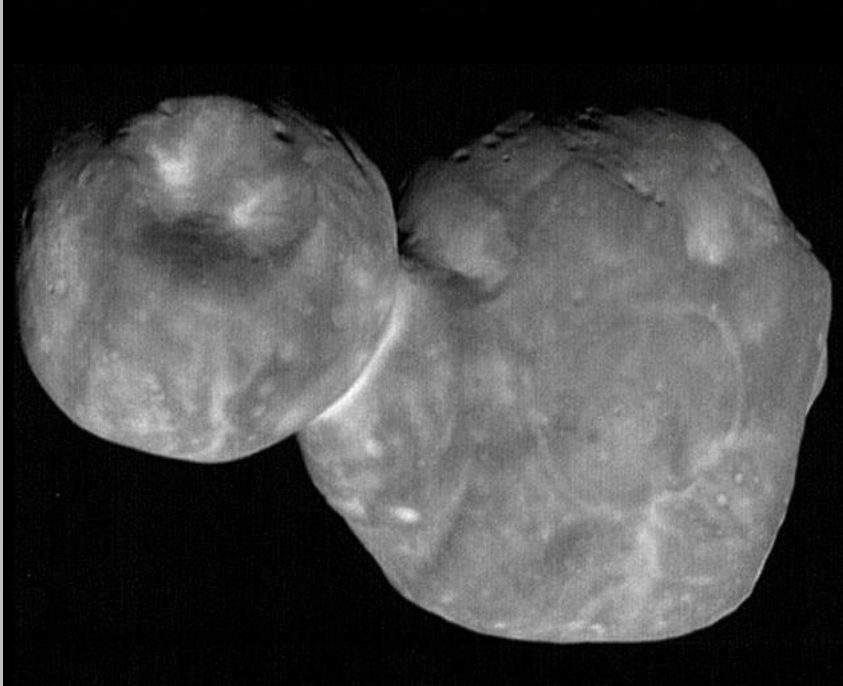
- Oggetti con parametri orbitali disomogenei tra di loro e valori alti di eccentricità e inclinazione:
- Eris.       $a = 67.781$        $e = 0.44$        $i = 44.2^\circ$       .



# SONDE OLTRE LA FASCIA DI KUIPER



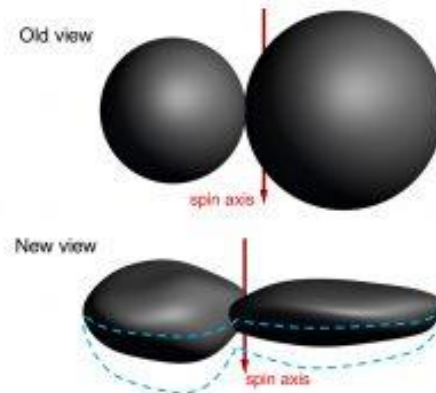
# NEW HORIZONS E ULTIMA-THULE



Sorvolo della sonda New Horizons del 1 gennaio 2019.



- $a = 44.581 \text{ U.A.}$
- $i = 2.45^\circ$
- $e = 0.042$



# COMETE

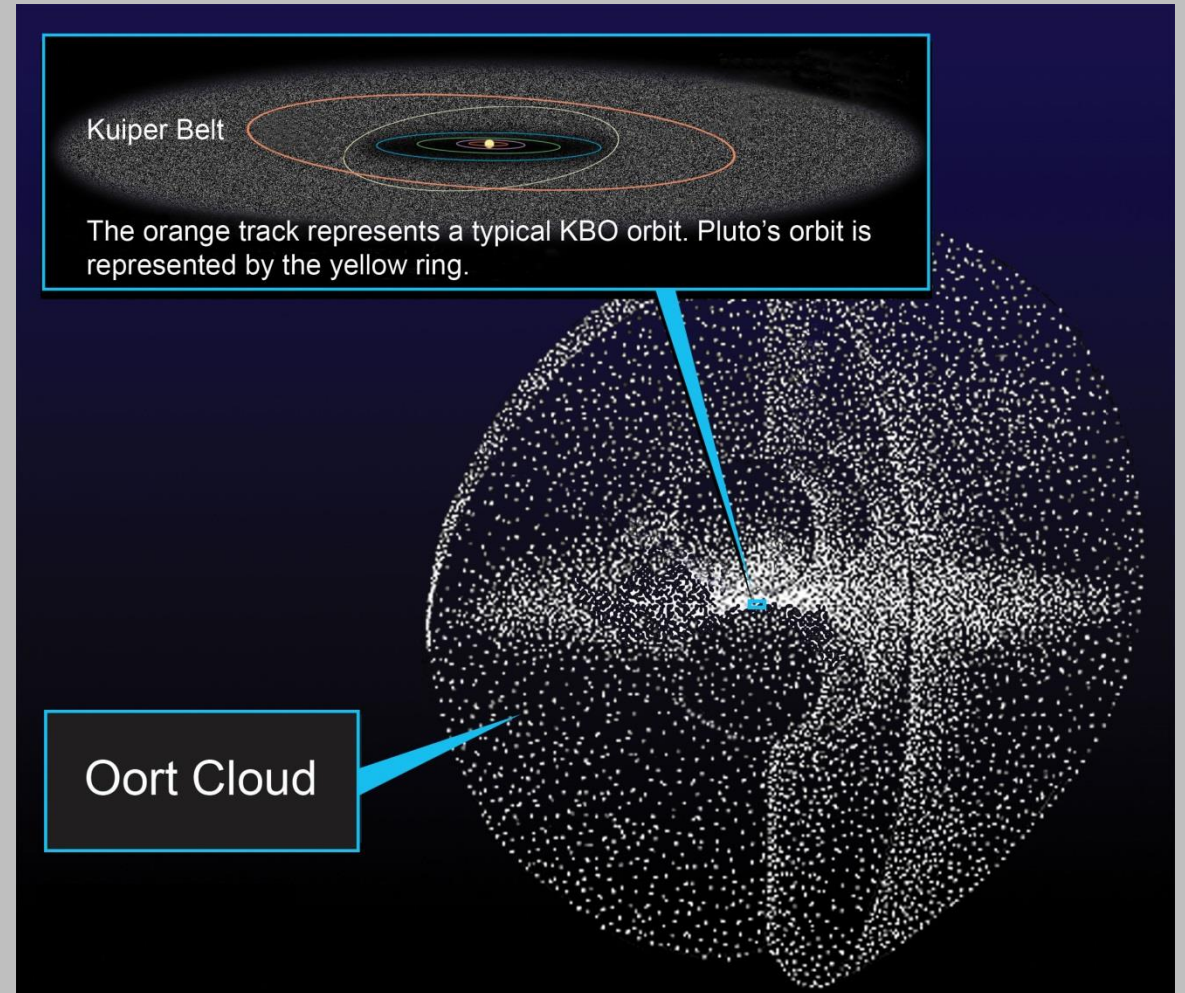


La cometa McNaught al tramonto, 11 dicembre 2009. Crediti: S. Deiries / ESO

- 5'500 oggetti catalogati (agosto 2017)
- Nucleo di pochi chilometri.
- All'avvicinarsi al Sole i ghiacci, principalmente di acqua e di anidride carbonica, presenti nel nucleo sublimano trasportando con sé le polveri (un insieme di silicati, solfuri, ossidi e materiali organici).
- Si formano così chioma e coda (di polveri e gas).
- Al massimo avvicinamento al Sole si raggiungono picchi di perdita di massa che variano tra i 100 e 10'000 kg al secondo.

# NUBE DI OORT

- E' la regione più distante del sistema solare.
- E' una struttura ipotetica, sferica, che si suppone circonda il sistema solare.
- Composta da un numero di oggetti compreso tra  $10^9$  e  $10^{21}$ .
- Con un limite più interno compreso tra 2'000 e 5'000 U.A. e un limite esterno compreso tra 10'000 e 100'000 U.A.
- E' il luogo di origine delle comete a lungo termine.





# FORMAZIONE DEL SISTEMA SOLARE

Qualunque modello di formazione del Sistema Solare deve tenere conto delle seguenti evidenze:

- a. Il moto di tutti i pianeti intorno al Sole è diretto (progrado).
- b. Tutti i pianeti si muovono su orbite praticamente complanari tra di loro.
- c. I pianeti interni hanno una densità maggiore, sono rocciosi e di dimensioni minori mentre i pianeti esterni sono meno densi, gassosi e di maggiori dimensioni.

Le fasi principali di formazione del Sistema Solare si possono così riassumere:

1. 4.6 miliardi di anni fa, una **nube a bassa densità di gas e polvere** interstellare **si contrae** per gravità.
2. La contrazione genera un **disco centrale, che contiene il 99.8% della massa** della nebulosa solare e **un disco appiattito in rotazione**, destinato a generare i pianeti.
3. Fase di '**condensazione**' degli elementi: accrezione dei **planetesimi** per collisioni costruttive.
4. Formazione dei **protopianeti**: per **collisioni distruttive** dei planetesimi.
5. Fase degli '**impatti giganti**': i pianeti così come li conosciamo oggi prendono forma.

# ALCUNI EFFETTI DELLA FASE DEGLI IMPATTI GIGANTI



Image from S.T. Stewart Lecture: 'The Violent Origin of Earth and Moon'.

# FORMAZIONE DELLA LUNA

Una corretta teoria della formazione lunare deve tenere conto delle seguenti caratteristiche:

- **l'età delle rocce lunari;**
- **la massa e la dimensione della Luna**, relativamente grandi rispetto a quelle della Terra;
- **l'inclinazione di 5°** dell'orbita lunare rispetto al piano orbitale della Terra;
- **la composizione chimica** della Luna;
- **l'abbondanza di alcuni isotopi** rispetto agli analoghi isotopi terrestri;
- le piccole dimensioni del **nucleo** ferroso della Luna (solo il 19% del diametro);
- **l'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre (23.5°).**

# L'ETÀ DELLA LUNA



## Datazione delle rocce lunari

Misura del rapporto uranio-piombo contenuto nella roccia.

Utilizzato per datare rocce che si sono formate e cristallizzate da un milione ad oltre 4.5 miliardi di anni fa, con una precisione nell'ordine dello 0.1-1%.

Per la Luna, è solitamente utilizzato sul minerale zirconio ( $\text{ZrSiO}_4$ ).

Lo zirconio incorpora gli atomi di uranio e di torio nella sua struttura cristallina. La quantità di Piombo misurata nella roccia è prodotto interamente dal decadimento radioattivo verificatosi dopo la formazione del minerale.

Dal rapporto tra piombo e uranio presente si determina l'età della roccia:  $4.47 \pm 0.05$  miliardi di anni.

# DIMENSIONI E INCLINAZIONE DELL'ORBITA

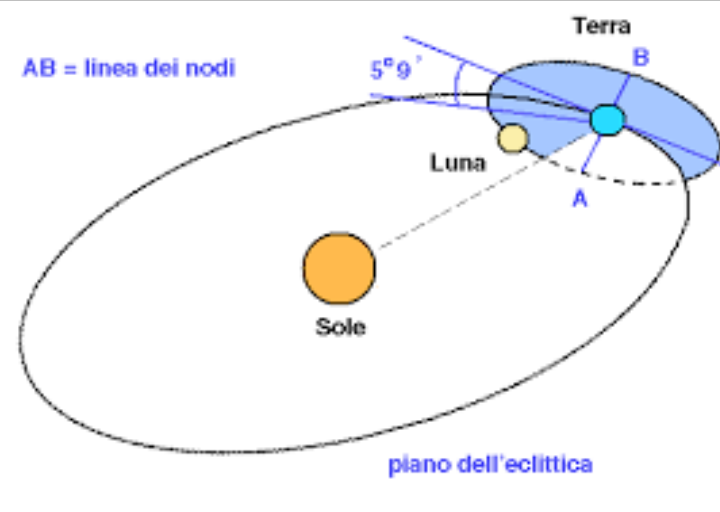
➤ Le dimensioni della Luna sono relativamente grandi rispetto a quelle della Terra.

La tabella riporta le dimensioni in chilometri e il rapporto dei diametri medi dei pianeti con il loro satellite principale:

Terra-Luna	Marte-Phobos	Giove-Ganimede	Saturno/Titano	Urano/Titania	Nettuno/Tritone
12'756 / 3'475	6'792 / 22.2	142'984 / 5'262	120'536 / 5'149	51'118 / 3324	49'528 / 2'707
3.67	306	27	23	15	18



➤ L'orbita lunare è inclinata di 5° 09' rispetto al piano orbitale della Terra (eclittica).



	Inclinazione
Luna	5° 09'
Phobos	1° 04'
Ganimede	0° 10'
Titano	0° 18'
Titania	0° 04'
Tritone	157°

## COMPOSIZIONE CHIMICA DELLA LUNA

- Ad eccezione degli elementi più volatili ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ) , la composizione chimica superficiale della Luna è molto simile a quella della Terra.
- Ogni altro satellite del sistema solare è per composizione chimica molto diverso rispetto al proprio pianeta.
- L'analisi dei rapporti degli isotopi dell'ossigeno nei meteoriti rivela che il sistema solare interno era dal punto di vista degli isotopi eterogeneo.
- Il rapporto tra gli isotopi dell'ossigeno è uguale a quello terrestre.
- Il fatto che Luna e Terra abbiano gli stessi rapporti isotopici indica un'origine alla stessa distanza dal Sole, a partire dallo stesso materiale.

# LE TEORIE PRINCIPALI SULLA FORMAZIONE DELLA LUNA

## Collisione solare

G. L. Leclerc, conte di Buffon  
XVIII secolo

## Cattura

Gerstenkorn  
1955

## Grande impatto

Hartmann e Davis, 1975  
Cameron, Ward, 1974

## Fissione

G. H. Darwin  
XIX secolo

## Accrezione

Ruskol  
1960



# LIMITI DELLE TEORIE INIZIALI SULLA FORMAZIONE DELLA LUNA

## Collisione

Dimensioni  
dell'oggetto  
impattante

Ricaduta del  
materiale espulso  
sul Sole  
(Laplace 1796)

## Fissione

Velocità di rotazione  
della Terra

Inclinazione  
dell'orbita della Luna

Tettonica terrestre

## Cattura

Rapporto degli  
isotopi dell'ossigeno

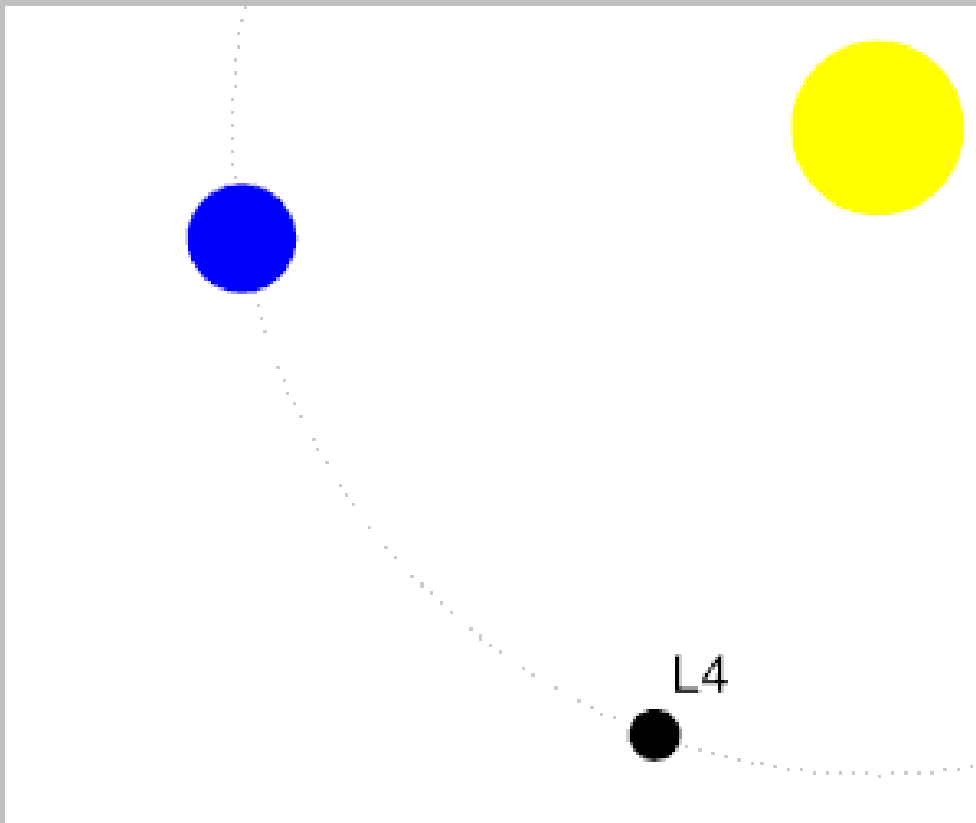
## Accrezione

Diversa densità tra  
Terra e Luna

Inclinazione  
dell'orbita della Luna

# THEIA E IL GRANDE IMPATTO

Theia è un ipotetico proto-pianeta che si forma sulla stessa orbita della Terra primordiale.



## Il modello spiega:

- la 'grande' massa lunare;
- il 'piccolo' nucleo ferroso;
- Il momento angolare del sistema;
- la mancanza di sostanze volatili.



## IMPRONTA ISOTOPICA DEL SISTEMA

- Il modello originale del 'Grande impatto' prevede che la massa della Luna provenga per circa il 70-80% dal materiale dell'oggetto impattante.
- **Terra e Luna** sono dal punto di vista **dell'impronta isotopica 'gemelli'**:
  - Ossigeno e Idrogeno. Sono volatili e variano notevolmente in funzione della zona della nebulosa solare in cui si sono formati.
  - Tungsteno, Silicio e Cromo. Sono radiogenici e forniscono un'indicazione sull'età del nucleo del corpo planetario.
- **Ogni corpo planetario ha la sua impronta isotopica** quindi Terra e Luna si devono essere formati dal materiale originale di entrambi i corpi.
- Abbandonare il modello del Grande Impatto o rivederne le ipotesi?

# IMPATTI PIÙ ENERGETICI

- Su quali parametri si può agire per rivedere il modello?
  - Impronta isotopica.
  - Massa della Luna.
  - Dimensioni del nucleo ferroso.
  - Carenza di sostanze volatili.
  - **Momento angolare del sistema.**
- Ipotesizzare impatti con tra corpi più massicci e/o più veloci.

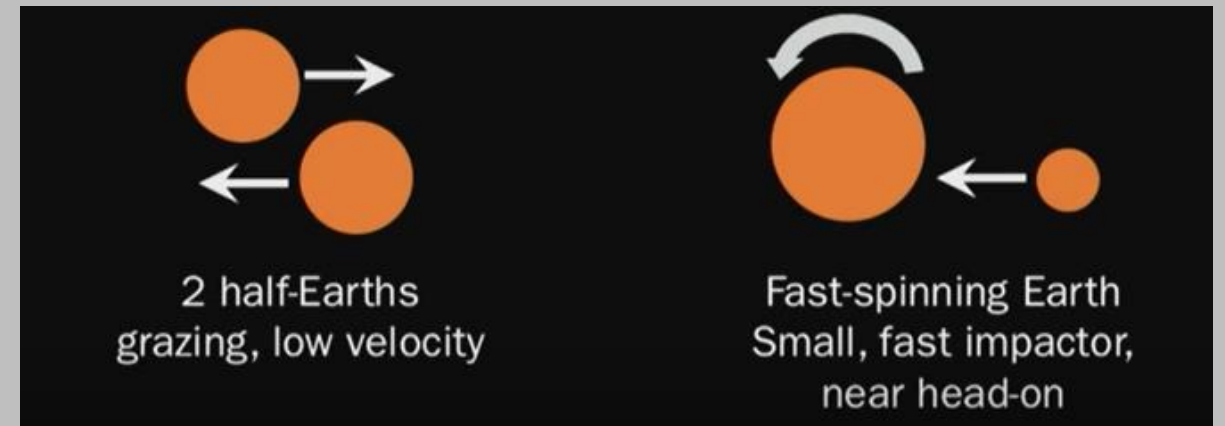
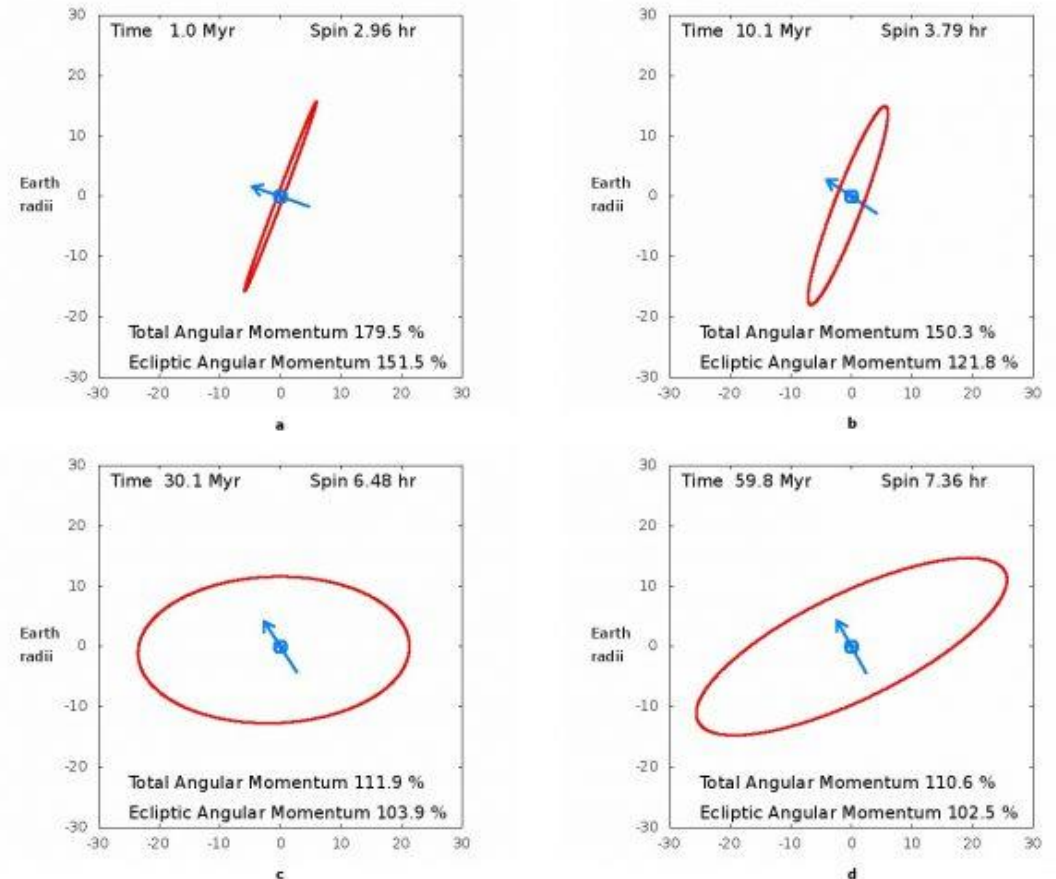


Image from S.T. Stewart Lecture: 'The Violent Origin of Earth and Moon'.

# L'ECCESO DI MOMENTO ANGOLARE

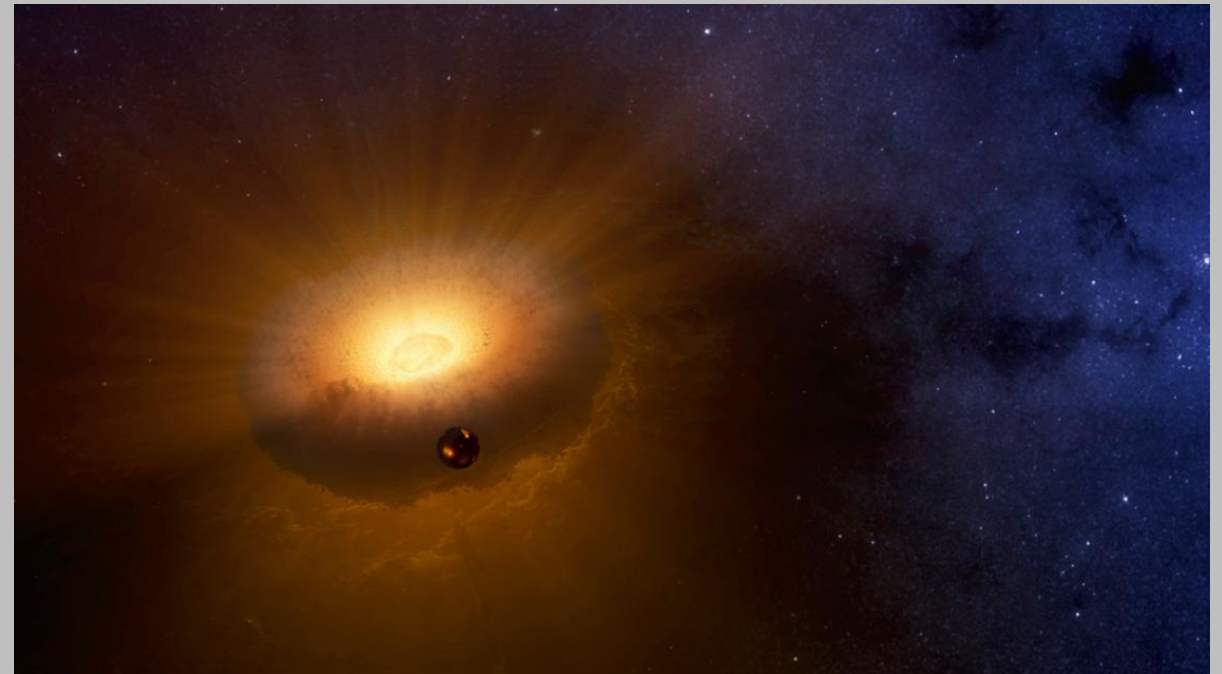
- **Risonanza orbitale Luna-Sole**  
M. Čuk, S. T. Stewart (2012). 'Making the Moon from a fast-spinning Earth: a giant impact followed by resonant despinning.'
- **Trasferimento del momento angolare** (S. Lock, T. Stewart, (2016).  
'Tidal evolution of the Moon from a high-obliquity, high-angular-momentum Earth'.



## SYNESTIA

- La synestia è una nuvola di materiale di forma toroidale, in moto vorticoso, che si genera dallo scontro ad alta energia e alto momento angolare tra due corpi proto-planetari. <https://arxiv.org/abs/1802.10223>. 'The origin of the Moon within a terrestrial synestia'.
- La Luna si forma all'interno della nuvola e successivamente, nel giro di poche centinaia di anni, ne fuoriesce come un singolo oggetto in orbita intorno alla proto-Terra.

[synestia.pdf](#)



## MORFOLOGIA LUNARE

- **Maria** o **Mari**: aree più basse e costituite da basalti scuri.
- **Highlands** o **Altopiani**: aree più elevate costituite da tre tipi di rocce plutoniche chiare ricche in feldspato:
  - le anortositi ferrihere, composte prevalentemente da plagioclasio con calcio e alluminio;
  - una suite ricca in magnesio costituita da noriti troctoliti e duniti;
  - particolari rocce denominate KREEP, ricche di elementi incompatibili (KREEP è un acronimo di potassio K, fosforo P e terre rare REE).
- **Crateri**: da impatto.
- **Rilievi**: al contrario della Terra, sono generati da impatti.

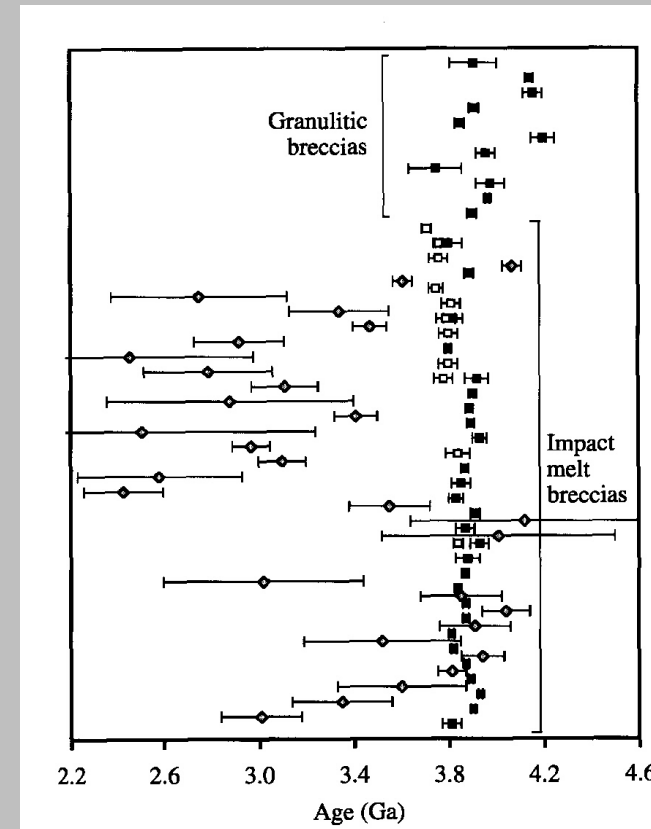
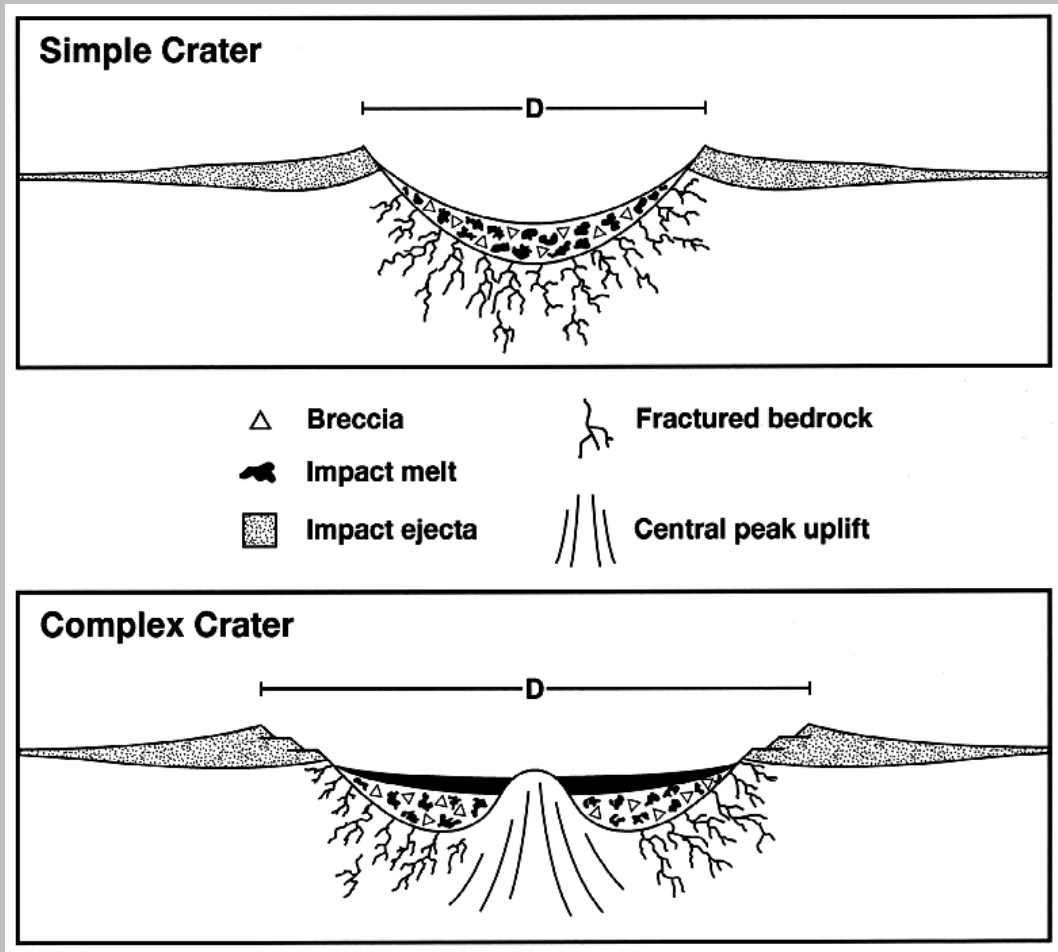
Altezza massima 10'786 m rispetto al raggio medio.





# CRATERI SEMPLICI E COMPLESSI

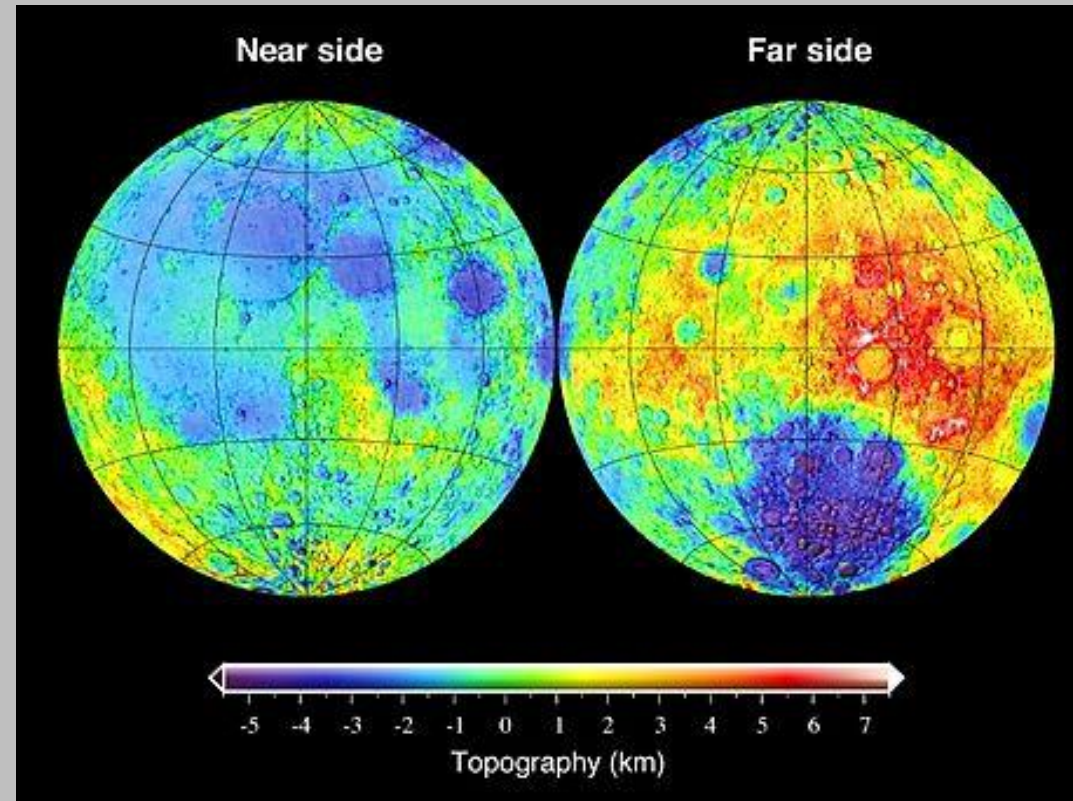
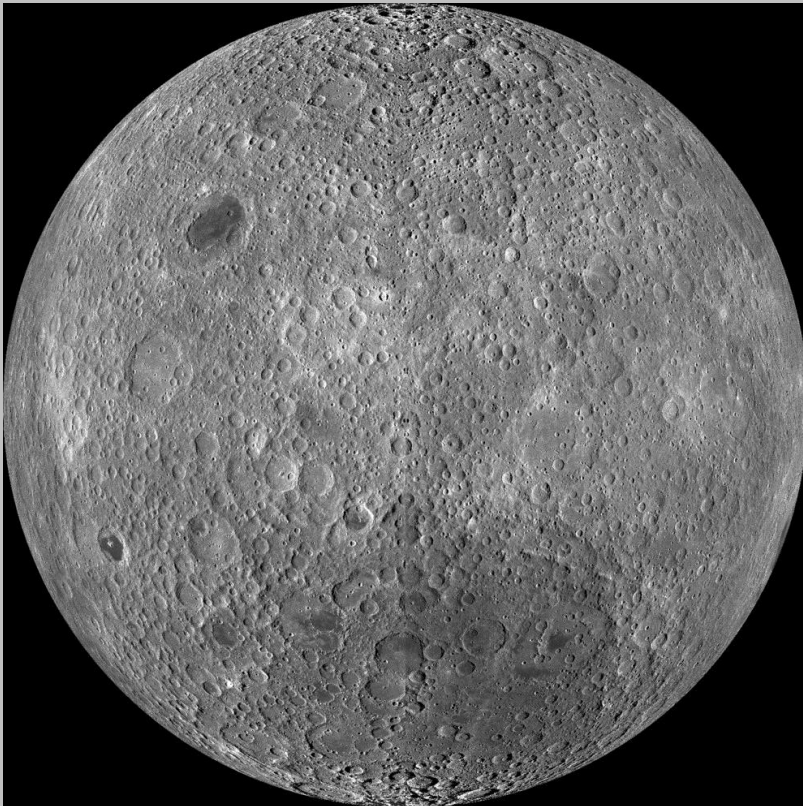
Limite tra i due tipi di cratere: 60 km



Frequenza dei crateri da impatto e il  
'bombardamento meteorico tardivo'

## LA FACCIA NASCOSTA DELLA LUNA

- Più craterizzata ma con meno bacini da impatto.
- Crosta più spessa rispetto alla faccia esposta.



# STRUTTURA INTERNA E ATTIVITÀ VULCANICA



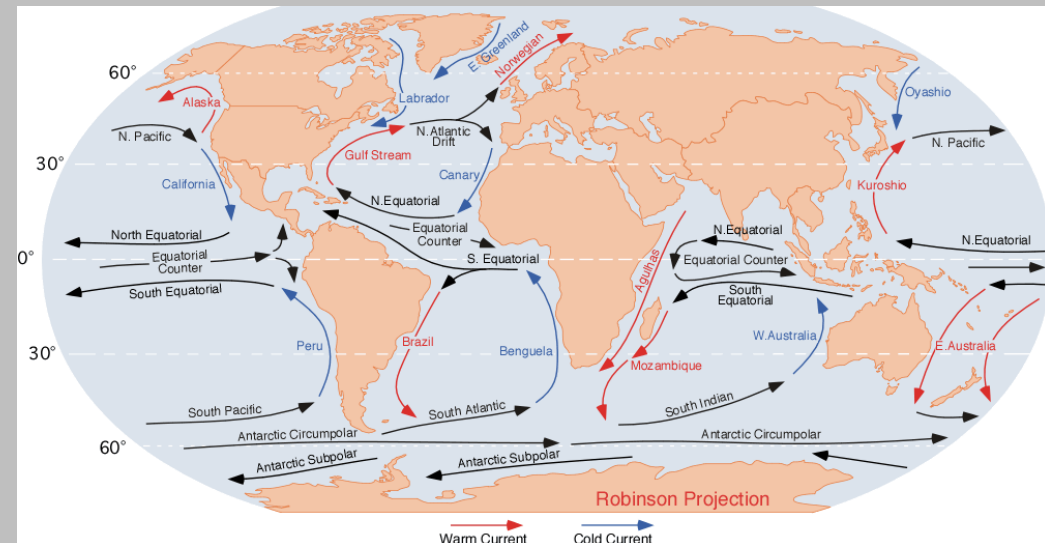
- La struttura interna determinata in base ai lunamoti è simile a quella terrestre ma con un nucleo di dimensioni più ridotte.
- La Luna, a differenza della Terra, è un corpo planetario a placca unica.
- Attività vulcanica: conclusa 1 miliardo di anni fa. Osservazioni recenti di LRO fanno pensare che sia durata sino a 50-100 milioni di anni fa.



# INFLUSSO DELLA LUNA SULLA TERRA

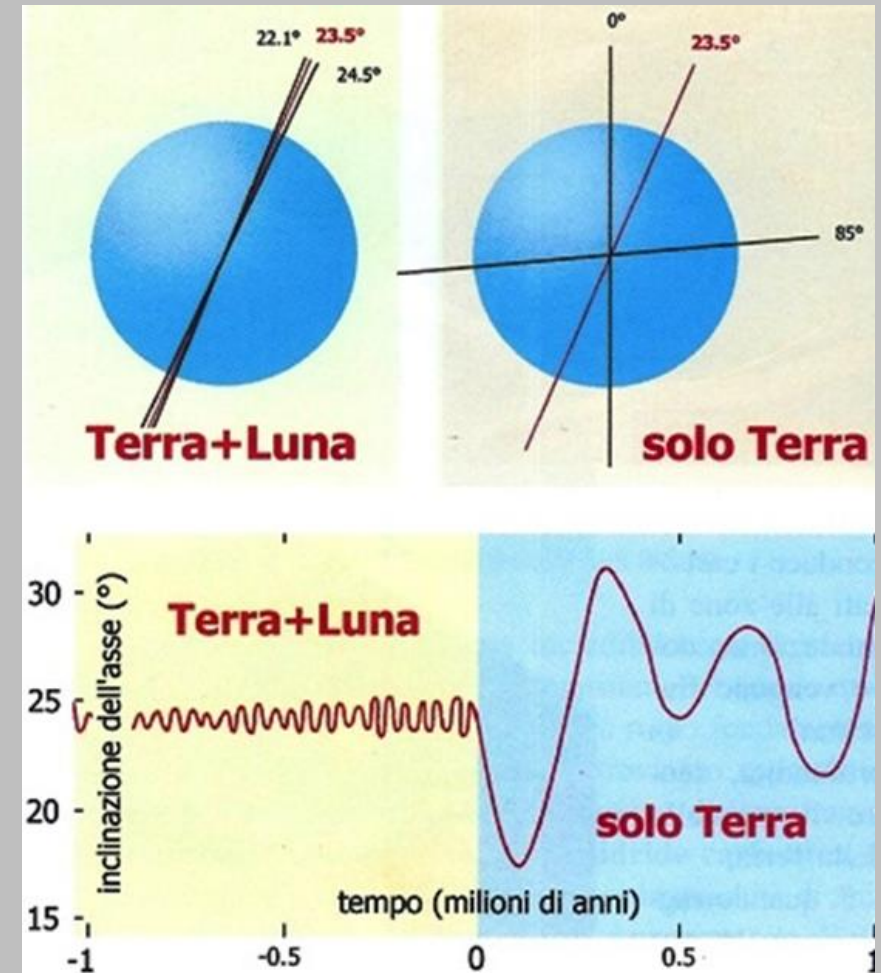
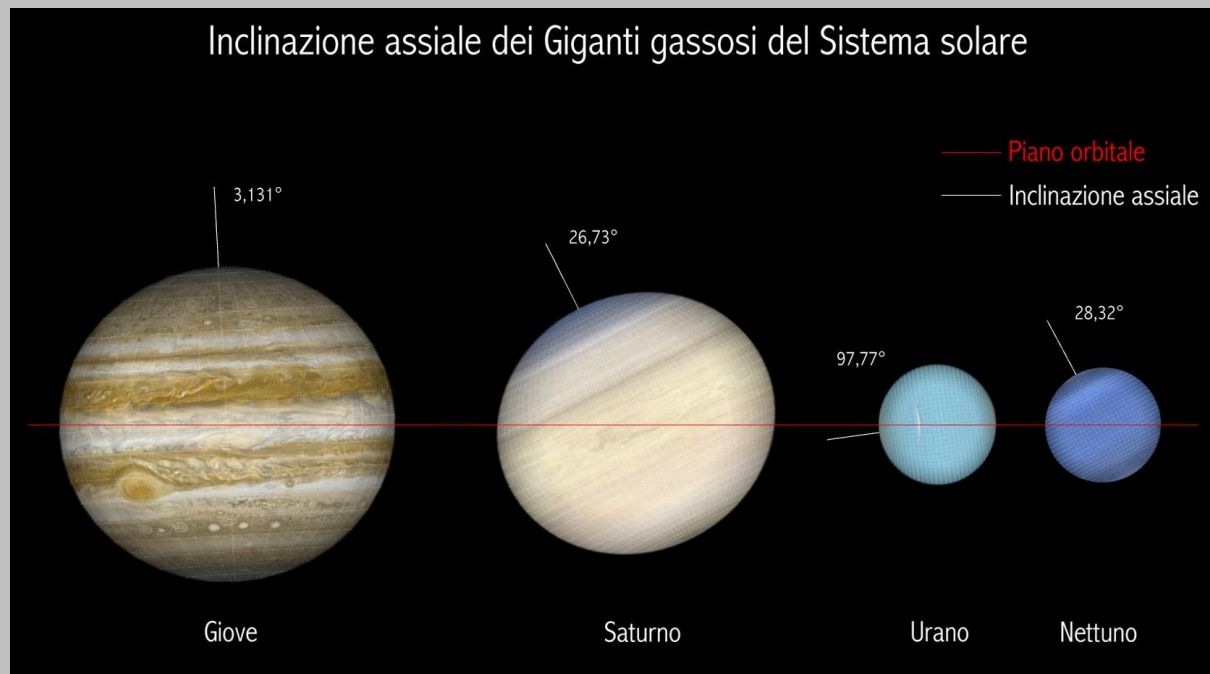
Gli influssi astronomici della Luna sulla Terra sono:

- le maree;
- stabilizzazione dell'asse di rotazione della Terra.



# INCLINAZIONE DELL'ASSE TERRESTRE

- In 10 milioni di anni l'inclinazione dell'asse terrestre potrebbe spostarsi sino ad 85°.



## VELOCITÀ DI ALLONTANAMENTO DALLA TERRA

La Luna si allontana dalla Terra di circa 3.8 cm all'anno.

Il processo di allontanamento terminerà quando la Luna raggiungerà una distanza maggiore del 50 per cento di quella attuale e un mese lunare durerà 50 giorni.



# MISSIONI LUNARI

## Missioni Passate

- Apollo - [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/apollo/missions/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/missions/index.html)
- Clementine - [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/LCROSS/searchforwater/clementine.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/LCROSS/searchforwater/clementine.html)
- LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) - <https://lunar.gsfc.nasa.gov/>
- Kaguya (JAXA) - [http://www.kaguya.jaxa.jp/index\\_e.htm](http://www.kaguya.jaxa.jp/index_e.htm)
- Chang'e 4 - Allunaggio sul lato nascosto della Luna

## Programmi futuri:

- ARTEMIS - <https://www.nasa.gov/artemis>
  - ARTEMIS 1 - SLS & Orion Test (2020)
  - ARTEMIS 2 - Missione con astronauti, aggancio alla stazione Gateway (2022)
  - ARTEMIS 3 - Sbarco sulla Luna (2024)
- Continuazione del programma Chang'e.



## APPENDICE A - TERRA, LUNA E GIOVE A CONFRONTO

	Terra	Luna	Luna/Terra	Giove
Massa ( $10^{24}$ kg)	5.9724	0.07346	0.0123	1898
Volume ( $10^{10}$ km <sup>3</sup> )	108.321	2.1968	0.0203	143'128
Densità media (g·cm <sup>-3</sup> )	5.514	3.344	-	1.326
Raggio equatoriale (km)	6378.1	1738.1	0.2725	71'492
Raggio polare (km)	6356.8	1736.0	0.2731	66'854
Schiacciamento polare [(a-b)/a]	0.0033	0.0012	-	0.0649
Gravità superficiale (m·s <sup>-2</sup> )	9.81	1.62	0.166	24.79 (1 bar)
Velocità di fuga (km·s <sup>-1</sup> )	11.19	2.38	-	59.5
Periodo di rotazione siderale	23.9344 ore	27.32 giorni	-	9.925 ore
Distanza media Terra-Luna (km)	-	384'400	-	-
Eccentricità media dell'orbita	0.017	0.055	-	0.049
Temperatura (°C)	-	-248 ÷ +123	-	-121

## APPENDICE B - CARATTERISTICHE DEI PIANETI

	MERCURIO	VENERE	TERRA	MARTE	GIOVE	SATURNO	URANO	NETTUNO
Massa ( $10^{24}$ kg)	0.33	4.87	5.97	0.642	1'898	568	86.8	102
Diametro (km)	4879	12,104	12'756	6792	142'984	120'536	51'118	49'528
Densità (kg/m <sup>3</sup> )	5427	5243	5514	3933	1326	687	1271	1638
Gravità (m/s <sup>2</sup> )	3.7	8.9	9.8	3.7	23.1	9	8.7	11
Velocità di fuga (km/s)	4.3	10.4	11.2	5	59.5	35.5	21.3	23.5
Periodo di rotazione (ore)	1'407.6	-5'832.5	23.9	24.6	9.9	10.7	-17.2	16.1
Lunghezza del giorno (ore)	4'222.6	2'802	24	24.7	9.9	10.7	17.2	16.1
Distanza dal Sole ( $10^6$ km)	57.9	108.2	149.6	227.9	778.6	1'433.5	2'872.5	4'495.1
Perielio ( $10^6$ km)	46	107.5	147.1	206.6	740.5	1'352.6	2'741.3	4444.5
Afelio ( $10^6$ km)	69.8	108.9	152.1	249.2	816.6	1'514.5	3'003.6	4'545.7
Periodo orbitale (giorni)	88	224.7	365.2	687	4'331	10'747	30'589	59'800
Velocità orbitale (km/s)	47.4	35	29.8	24.1	13.1	9.7	6.8	5.4
Inclinazione orbitale (gradi)	7	3.4	0	1.9	1.3	2.5	0.8	1.8
Eccentricità dell'orbita	0.205	0.007	0.017	0.094	0.049	0.057	0.046	0.011
Inclinazione asse di rotazione (gradi)	0.034	177.4	23.4	25.2	3.1	26.7	97.8	28.3
Temperatura media (C)	167	464	15	-65	-110	-140	-195	-200
Pressione superficiale (bar)	0	92	1	0.01	Sconosciuta	Sconosciuta	Sconosciuta	Sconosciuta
Numero di lune	0	0	1	2	79	62	27	14
Sistema di anelli?	No	No	No	No	Sì	Sì	Sì	Sì
Campo magnetico globale?	Sì	No	Sì	No	Sì	Sì	Sì	Sì

<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>