Forze o Interazioni fondamentali

In natura esistono 4 tipi di forze fondamentali (dette anche interazioni fondamentali) ciascuna delle quali relativa ad una specifica caratteristica dei corpi sui quali agiscono:

✓ FORZA GRAVITAZIONALE: generata dalla massa dei corpi

✓ FORZA ELETTROMAGNETICA: generata dalla cariche elettriche

✓ FORZA NUCLEARE FORTE: lega i quark che compongono protoni e neutroni all'interno del nucleo

✓ FORZA NUCLEARE DEBOLE: interviene in alcuni processi nucleari, come ad es. il decadimento del neutrone in protone + elettrone + neutrino

In questo corso ci occuperemo soltanto delle prime 2

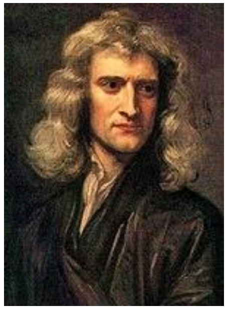
Interazioni a distanza

- L’interazione meccanica (urto) tra due corpi è una semplificazione dovuta alla nostra impossibilità di vedere le reali interazioni a livello microscopico. *La meccanica classica è un’utile semplificazione, funziona perfettamente per la maggior parte delle nostre esperienze quotidiane, o per la costruzione di edifici, strade, ponti,* ecc…

- In realtà*, il “contatto tra i corpi” è un’astrazione mentale: TUTTE LE INTERAZIONI AVVENGONO A DISTANZA*: un corpo genera forze nello spazio circostante che agiscono a distanza su corpi aventi la stesse caratteristica.

- Due esempi di esperienza comune sono *la forza magnetica esercitata da una calamita* su oggetti di ferro, e la *forza di gravità esercitata da corpi che hanno massa* su altri corpi che hanno massa.

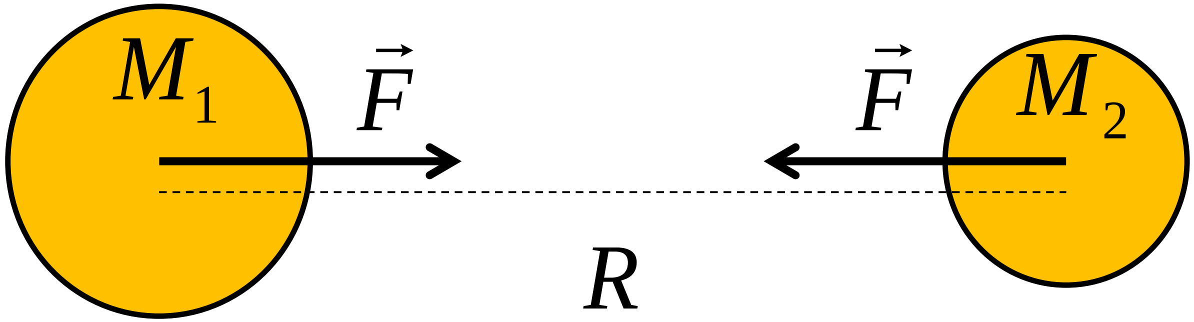
La forza gravitazionale



❑ Newton ha un'intuizione straordinaria: *la forza che causa la caduta di una mela sulla Terra è la stessa forza che mantiene i pianeti in orbita attorno al Sole, e la Luna attorno alla Terra* !!

❑ Nel libro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, del 1687, egli enuncia la Legge di Gravitazione Universale

FORZA GRAVITAZIONALE



$$F = G\frac{M_1 M_2}{R^2}$$

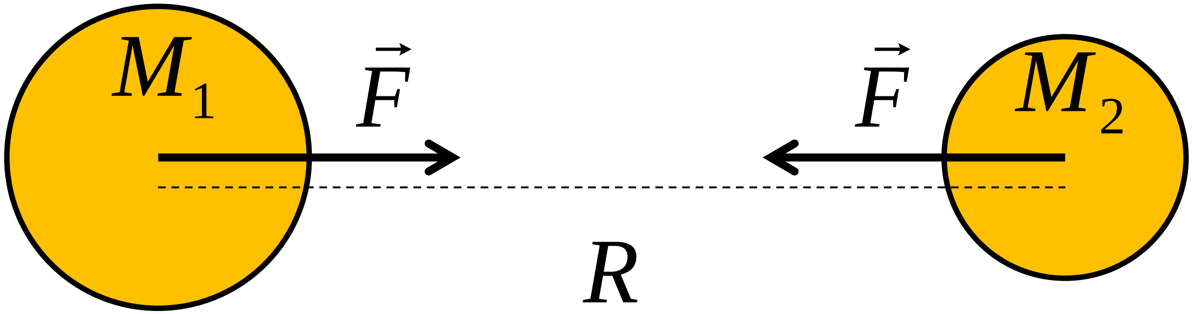
✓ *Dati due corpi di massa M_1, M_2, essi si attraggono con una forza **F** direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse, ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza*

✓ La forza gravitazionale è sempre diretta lungo la retta congiungente i due corpi

✓ Il *verso della forza è sempre attrattivo*: la forza agisce in modo da avvicinare i corpi

✓ *La forza è sempre applicata nel centro di massa del corpo*; dunque la distanza R che compare nell'espressione della forza è la distanza dai due centri

FORZA GRAVITAZIONALE



$$F = G\frac{M_1 M_2}{R^2}$$

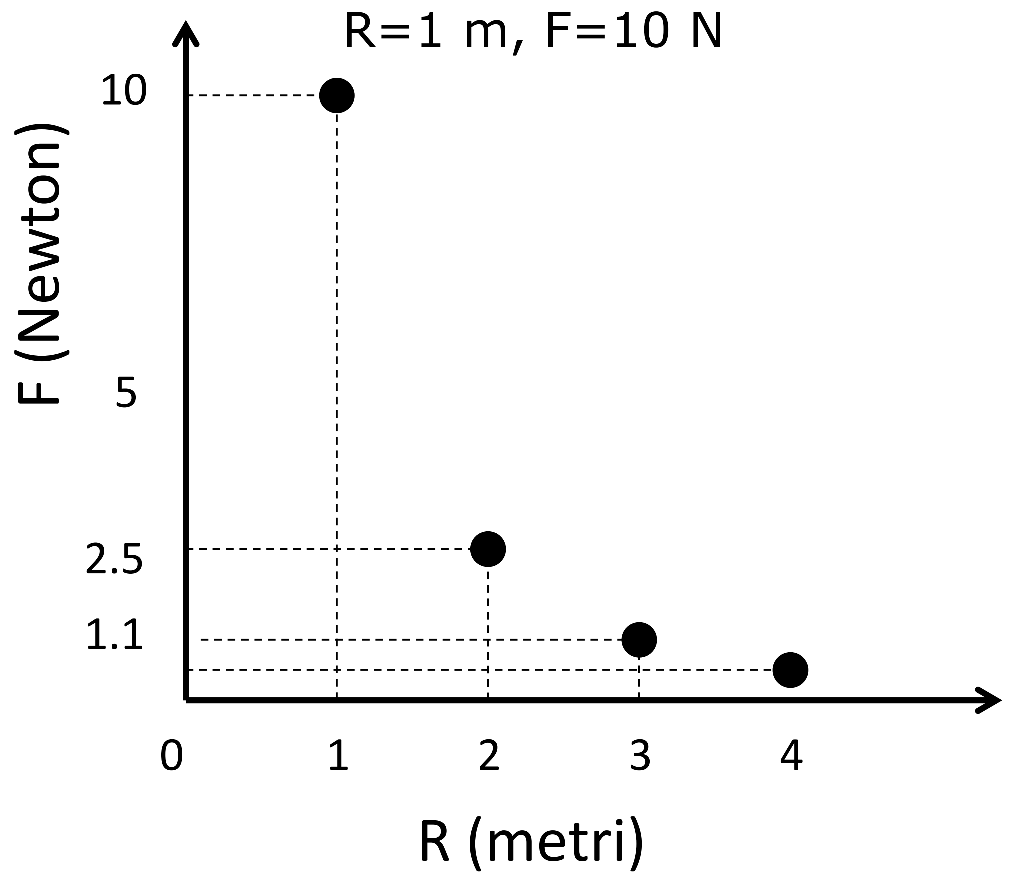
✓ Notiamo che la forza con cui il corpo M_1 è attratto verso M_2 è *uguale in modulo e direzione ma opposta in verso* alla forza con cui il corpo M_2 è attratto da M_1; ovvero *ciascuno dei due attrae l'altro con forza uguale in modulo e direzione, ma contraria in verso*

✓ Dunque la forza gravitazionale soddisfa 3° principio della dinamica (principio di azione e reazione)

Dipendenza della forza dal quadrato della distanza tra i corpi

Consideriamo F come una funzione della distanza tra i corpi, ovvero F(R); la formula di Newton ci dice che la forza gravitazionale è inversamente proporzionale al quadrato della distanza

Nel grafico scriviamo i valori di R sull'asse x e di F sull'asse y; supponiamo che per R = 1 m la forza sia F = 10 N; troviamo i valori di F per R = 2 m, R =3 m, R=4 m



La forza gravitazionale diminuisce col quadrato della distanza dai corpi: è una diminuzione molto rapida

Costante di Forza Gravitazionale

$$F = G\frac{M_1 M_2}{R^2}$$

G è detta *costante di forza gravitazionale o costante di gravitazione universale*; è esattamente la stessa per tutti i corpi dotati di massa, siano essi grandi come stelle o piccoli come granelli di sabbia

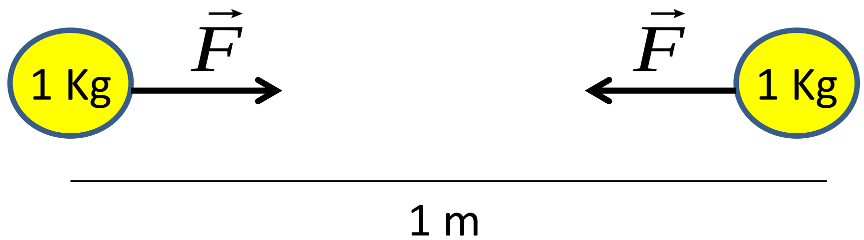
Dalla formula della forza si vede che l'unità di misura di *G* è Nm^2/Kg^2; per esprimere *G* in termini di sole unità fondamentali sostituisco il Newton con $Kg\ m/s^2$ e si ottiene:

$$G = 6.7\times10^{-11}\,N\frac{m^2}{Kg^2} = 6.7\times10^{-11}\frac{m^3}{Kg\,s^2}$$

G è una quantità MOLTO PICCOLA: la forza gravitazionale è la più debole delle 4 forze fondamentali della natura

Esercizio: forza gravitazionale tra piccole masse

Calcoliamo la forza attrattiva tra 2 sfere, entrambe di massa M=1 Kg, a distanza di 1 m

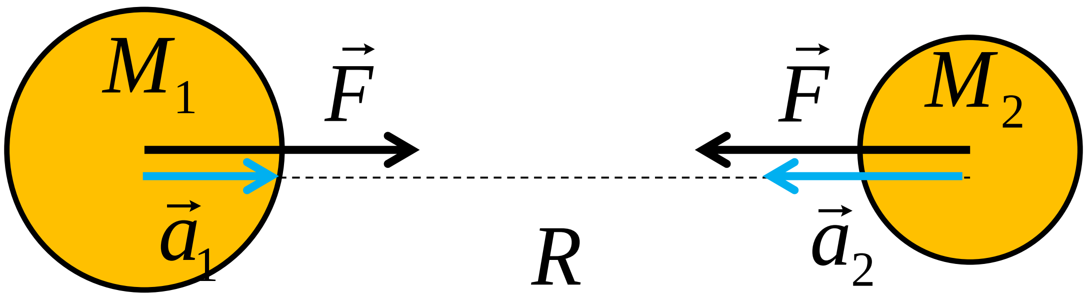


$$F = G\frac{1Kg^2}{1m^2} = 6.7\times10^{-11}\frac{Nm^2}{Kg^2}\frac{1Kg^2}{1m^2} = 6.7\times10^{-11}N$$

È una forza *immensamente piccola* !! si consideri che 1 N è la forza peso di un oggetto di 100 g, ad esempio una mela.
Se le due sfere fossero poggiate su un tavolo non potrebbero muoversi mai, poiché anche un minimo attrito col suolo sarebbe sufficiente a contrastare ed annullare questa piccola forza

Morale delle favola*: la forza gravitazionale è importante solo se almeno uno dei due corpi che interagiscono ha una massa enorme*, come un pianeta ad esempio; altrimenti è del tutto irrilevante

Accelerazione (campo) gravitazionale



$$F = G\frac{M_1 M_2}{R^2}$$

Dalla forza calcoliamo facilmente l'accelerazione della massa M_1 utilizzando il 2° Principio della dinamica:

$$a_1 = \frac{F}{M_1} = G\frac{M_2}{R^2}$$

Dunque l'accelerazione di M_1 è proporzionale alla massa M_2. Applico lo stesso procedimento per calcolare l'accelerazione di M_2

$$a_2 = \frac{F}{M_2} = G\frac{M_1}{R^2}$$

L'accelerazione di M_2 è proporzionale alla massa M_1. Dunque *le forze sono le stesse, ma l'accelerazione è maggiore per il corpo più leggero*

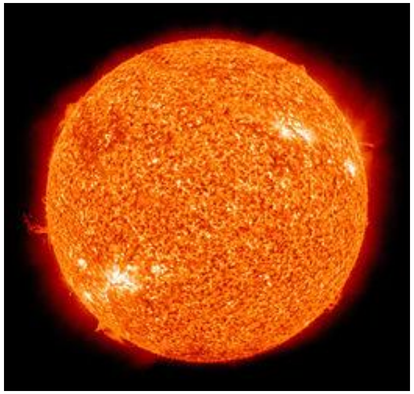
Dati utili

Terra:

Raggio: 6370 km
Distanza dal sole: 149.6×10^6 Km
Massa: 6×10^{24} Kg

Luna:

Raggio: 1738 km
Distanza dalla terra: 3.8×10^5 Km
Massa: 7.3×10^{22} Kg



Sole:

Raggio: 695700 Km
Massa: 2×10^{30} Kg

Esercizio: attrazione Terra-Luna

1) Calcolare la forza di attrazione gravitazionale tra la Terra e la Luna

$$F = G\frac{M_T M_L}{R_{TL}^2} = 6.7\times10^{-11} N\frac{m^2}{Kg^2}\frac{6\times10^{24} Kg\times7.3\times10^{22} Kg}{\left(3.8\times10^8 m\right)^2} = 2\times10^{20} N$$

2) Calcolare l'accelerazione della Luna:

$$a_L = \frac{F}{M_L} = \frac{2\times10^{20} N}{7.3\times10^{22} Kg} = 0.27\times10^{-2}\frac{m}{s^2}$$

3) Calcolare l'accelerazione della Terra:

$$a_T = \frac{F}{M_T} = \frac{2\times10^{20} N}{6\times10^{24} Kg} = 0.33\times10^{-4}\frac{m}{s^2}$$

La forza gravitazionale tra Terra e Luna è la stessa per entrambe, ma *l'accelerazione della Luna è circa 100 volte maggiore di quella della Terra, poiché la massa della Luna è 100 volte più piccola* !!

Nulla è fermo nell’Universo

- Se tra due corpi inizialmente fermi accendessimo improvvisamente la forza di gravità, come descritto dalla Legge di gravitazione sarebbero attratti da una forza diretta lungo la congiungente; poiché la velocità prodotta dall’accelerazione sarebbe radiale, ovvero parallela all’accelerazione, essi si schianterebbero l’uno contro l’altro

- Nell’Universo però nulla è fermo: i pianeti ruotano attorno al proprio asse e attorno alle stelle, le stelle attorno al centro delle galassie, le galassie viaggiano nello spazio.

- L’enorme energia liberata dal Big Bang ha eiettato in tutte le direzioni dello Spazio un brodo primordiale di particelle elementari di enorme energia; scontrandosi ed aggregandosi tra loro, esse hanno dato origine prima ad atomi e molecole, e successivamente ai corpi celesti (stelle, pianeti, asteroidi, nubi gassose)

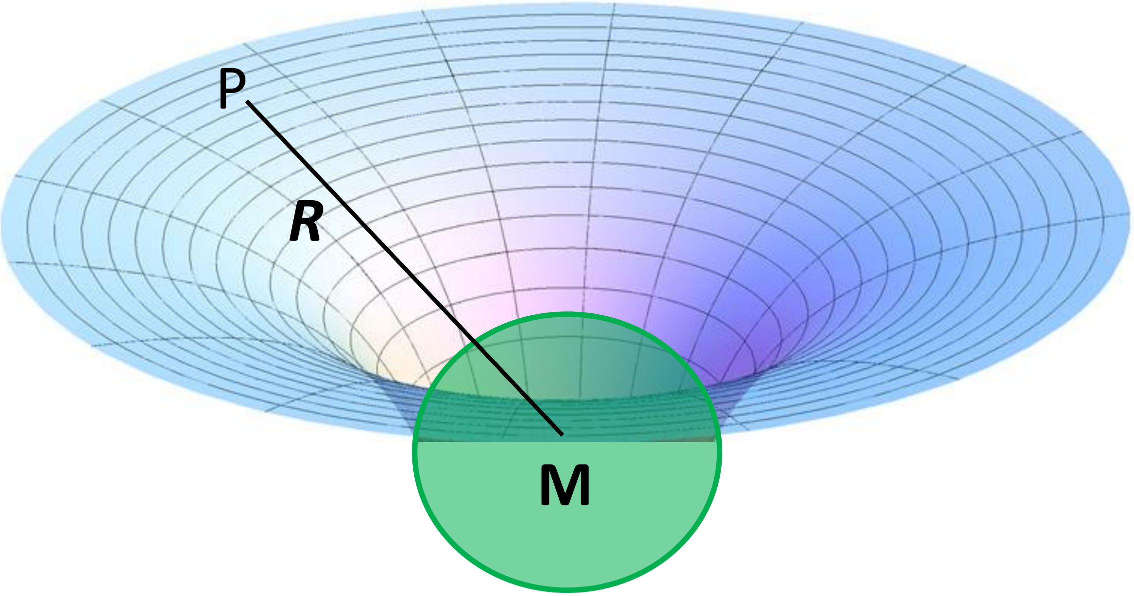
- Poiché l’energia non si distrugge, ogni corpo presente nell’Universo possiede una frazione dell’energia originariamente liberata nel Big Bang, e viaggia nello Spazio con una certa velocità

Accelerazione come campo gravitazionale

- L'accelerazione di gravità generata da un corpo di massa M è anche detta CAMPO GRAVITAZIONALE di M
- Il campo gravitazionale è raffigurato come un cono o una rete generata dalla massa M nello spazio circostante; se un'altra massa passa vicino ad M finisce nel suo cono attrattivo e viene catturata
- In un punto P distante *R* dal centro di massa M, il campo gravitazionale vale:

$$a = G\frac{M}{R^2}$$

dunque il campo è tanto più forte quanto più *R* è piccolo, ovvero quanto più siamo vicini ad M; inoltre il campo è tanto più forte quanto più grande è M



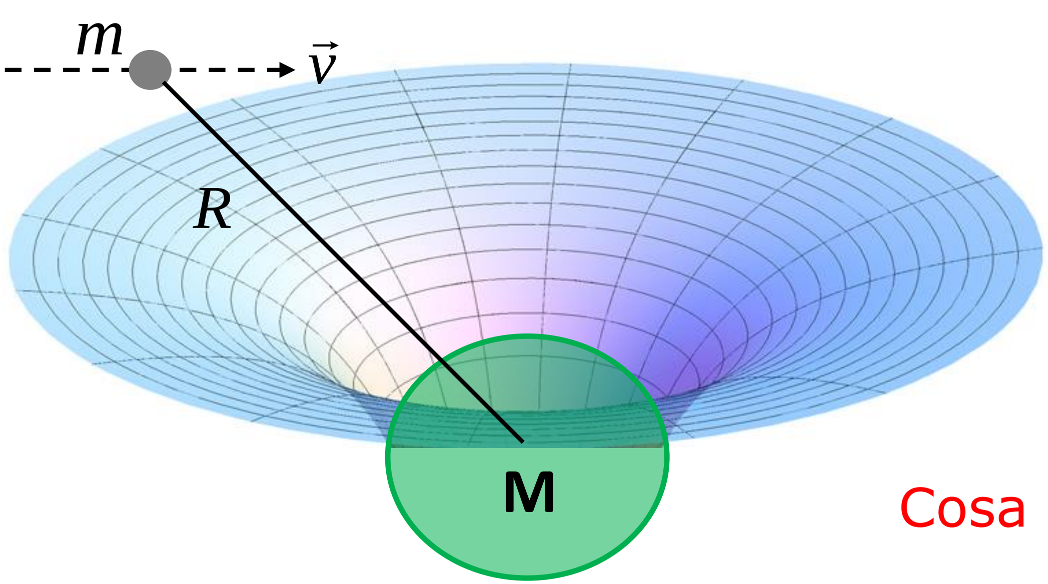
Il campo gravitazionale

Supponiamo che una massa più piccola m arrivi con velocità ***v*** nel campo gravitazionale generato da m; in qualsiasi punto distante *R* dal centro di massa di M il campo di gravità vale:

$$a = G\frac{M}{R^2}$$

La forza subita da m è data dalla Legge della Dinamica:

$$F = m\,a = G\frac{mM}{R^2}$$

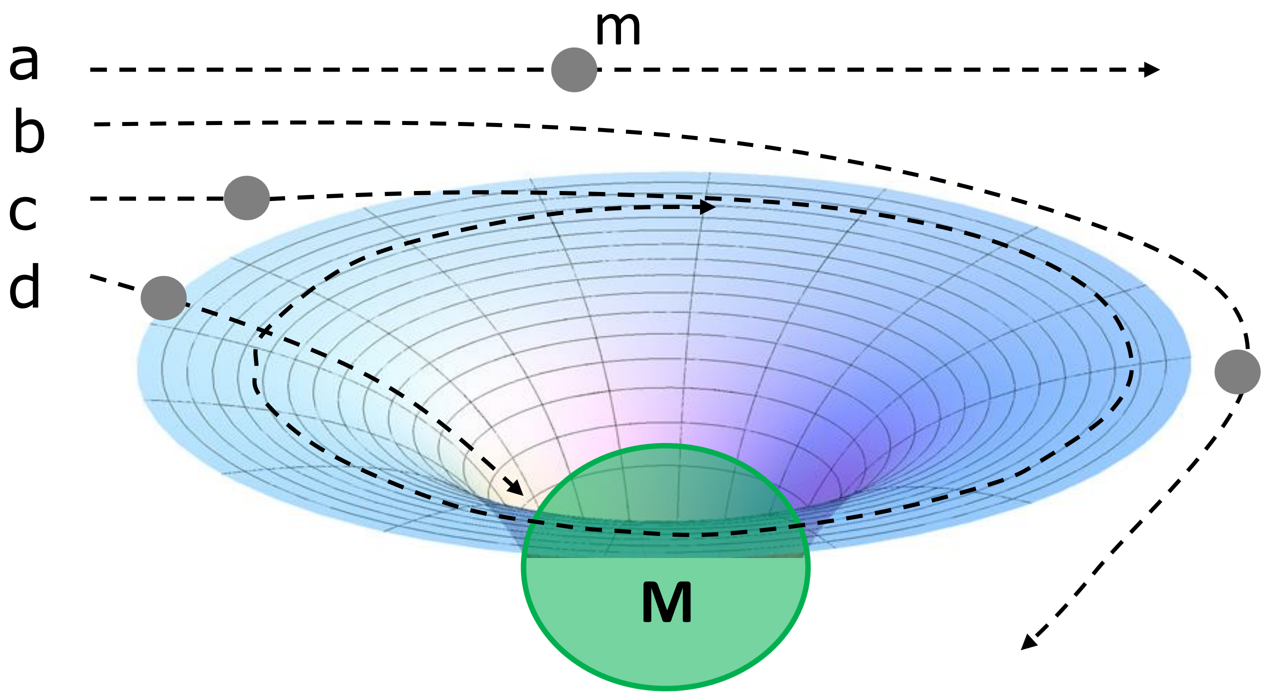


Cosa succede alla massa m ?

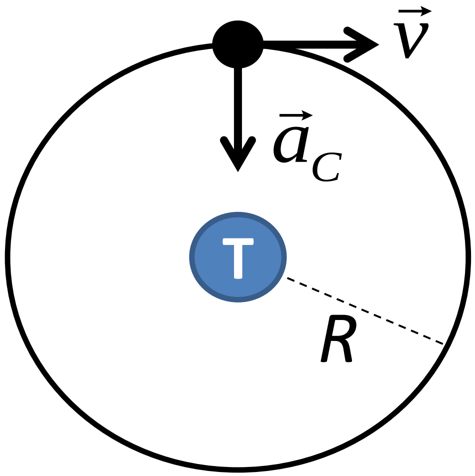
Il campo gravitazionale

Possono verificarsi 4 diversi casi:

a) I due corpi sono abbastanza distanti, per cui il campo gravitazionale di M non è sufficientemente grande per attrarre m, che prosegue indisturbato
b) m sente l'attrazione gravitazionale di M, devia dalla traiettoria originale e si riallontana proseguendo di moto rettilineo uniforme
c) m subisce l'attrazione gravitazionale di M e viene catturata in una traiettoria chiusa, iniziando ad orbitare attorno ad M
d) m è talmente vicino da precipitare su M



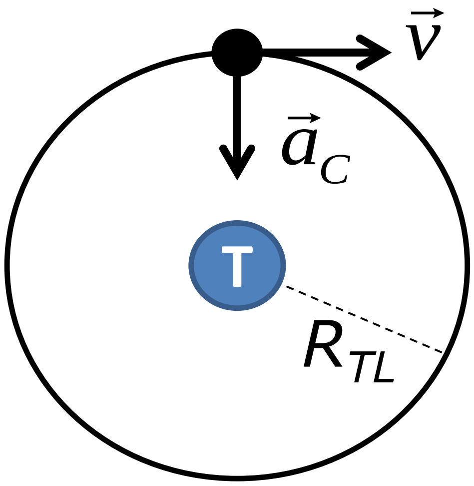
Moto circolare uniforme



- Il MOTO CIRCOLARE UNIFORME è un moto ACCELERATO, in cui velocità e accelerazione sono entrambe COSTANTI in modulo, mentre la loro direzione cambia nel tempo
- Ad ogni istante la velocità è sempre diretta tangenzialmente alla traiettoria circolare; l'accelerazione è sempre diretta verso il centro del cerchio, e per questo è detta centripeta (a_c)
- Il moto dei corpi celesti che orbitano attorno a corpi molto più grandi (come nel caso Terra-Luna o Sole-Terra) può essere approssimativamente raffigurato come un moto circolare uniforme: la Luna percorre un cerchio attorno alla Terra ferma nel centro
- In realtà nella maggior parte dei casi le traiettorie sono ellittiche, ma per il momento trascuriamo questo aspetto
- Nel moto circolare uniforme, abbiamo una relazione che lega accelerazione centripeta, velocità, e raggio dell'orbita:

$$a_c = \frac{v^2}{R}$$

Moto circolare della Luna



Nel caso dell'orbita lunare, il raggio del moto circolare uniforme non è altro che la distanza Terra-Luna: $R=R_{TL}$
Inoltre abbiamo già calcolato in precedenza l'accelerazione della Luna dovuta all'attrazione terrestre:

$$a_C = \frac{v^2}{R_{TL}} = 0.27 \times 10^{-2} \frac{m}{s^2}$$

Dalla formula precedente possiamo ricavare la velocità tangenziale con cui la Luna orbita attorno alla terra:

$$v^2 = a_C R_{TL} = 0.27 \times 10^{-2} \frac{m}{s^2} \times 3.8 \times 10^8 m = 10^6 \frac{m^2}{s^2}$$

$$v = \sqrt{10^6 \frac{m^2}{s^2}} = 10^3 \frac{m}{s} = 1 \frac{Km}{s} = 3600 \frac{Km}{h}$$

Moto circolare della Luna

Dalla formula del perimetro del cerchio ricaviamo la circonferenza orbitale, ovvero la distanza percorsa dalla Luna in un giro completo attorno alla Terra:

$$C = 2\pi R_{TL} = 6.28 \times 3.8 \times 10^5 \, Km = 2.4 \times 10^6 \, Km$$

Muovendosi alla velocità tangenziale di 1 Km/s, in quanto tempo la Luna compie *un giro completo* attorno alla Terra ? Ricordiamo che la velocità è il rapporto tra spazio percorso e tempo impiegato, per cui, se indichiamo con T il *periodo di rivoluzione* della Luna:

$$v = \frac{C}{T}$$

Dalla formula inversa ricaviamo il periodo T:

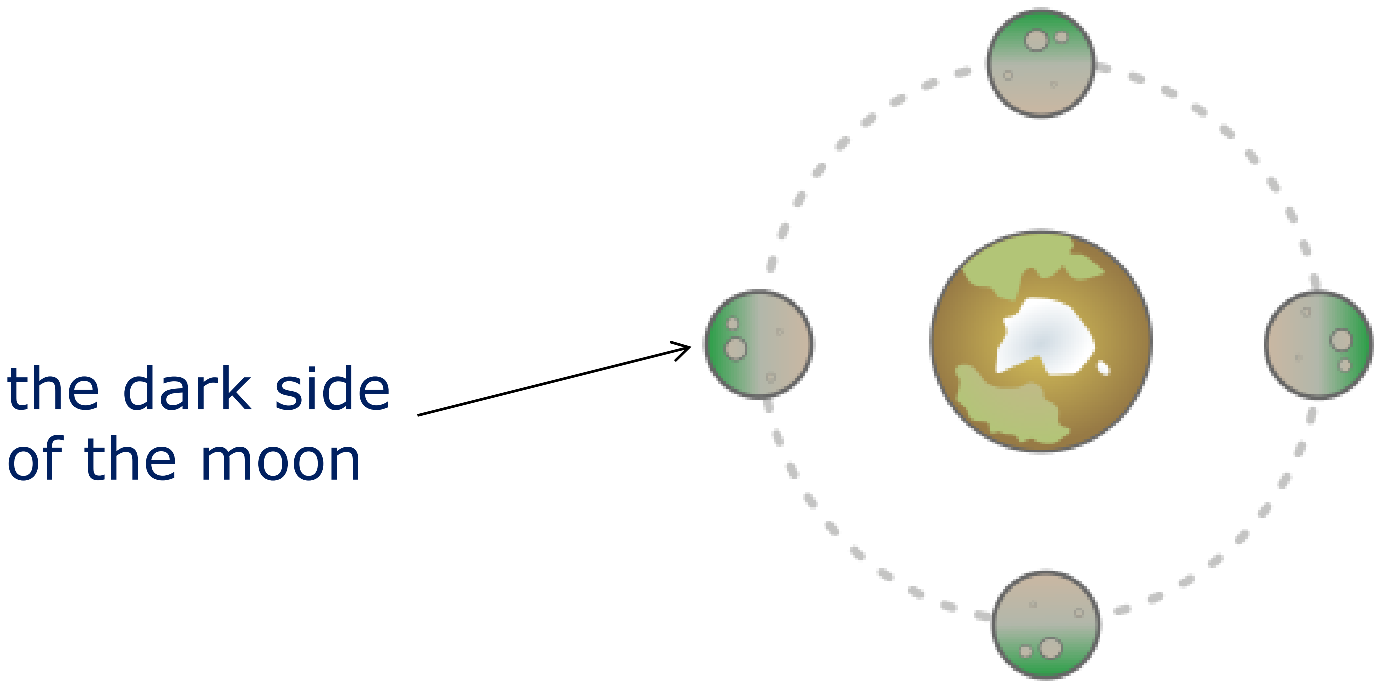
$$T = \frac{C}{v} = \frac{2.4 \times 10^6 \, Km}{1 \dfrac{Km}{s}} = 2.4 \times 10^6 \, s$$

In un giorno ci sono 86400 s; la Luna compie *un giro completo* attorno alla Terra in 2.4 milioni di secondi, corrispondenti a *27 giorni, 7 ore e 43 minuti*

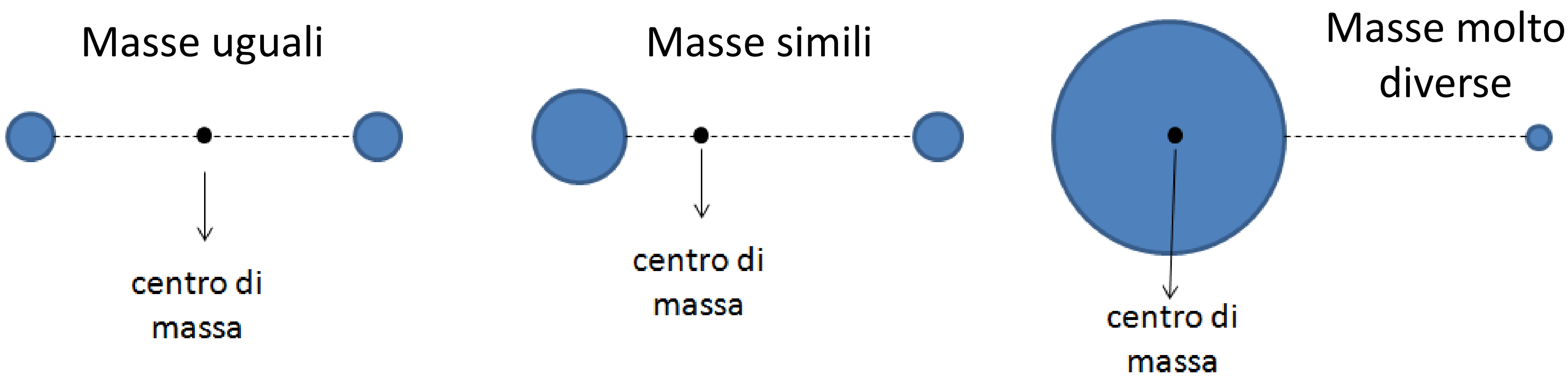
The dark side of the moon

La Luna è un *caso di rotazione sincrona*: il suo periodo di rivoluzione attorno alla Terra è uguale a quello di rotazione attorno al proprio asse. Conseguenza di ciò è che la *Luna mostra alla Terra sempre la stessa faccia !!*

La rotazione sincrona si verifica quando la distanza del corpo dal centro di gravità è piccola, ed è causata da complessi effetti gravitazionali. Quasi tutti i satelliti ruotano attorno ai rispettivi pianeti con rotazione sincrona



Rotazione e centro di massa



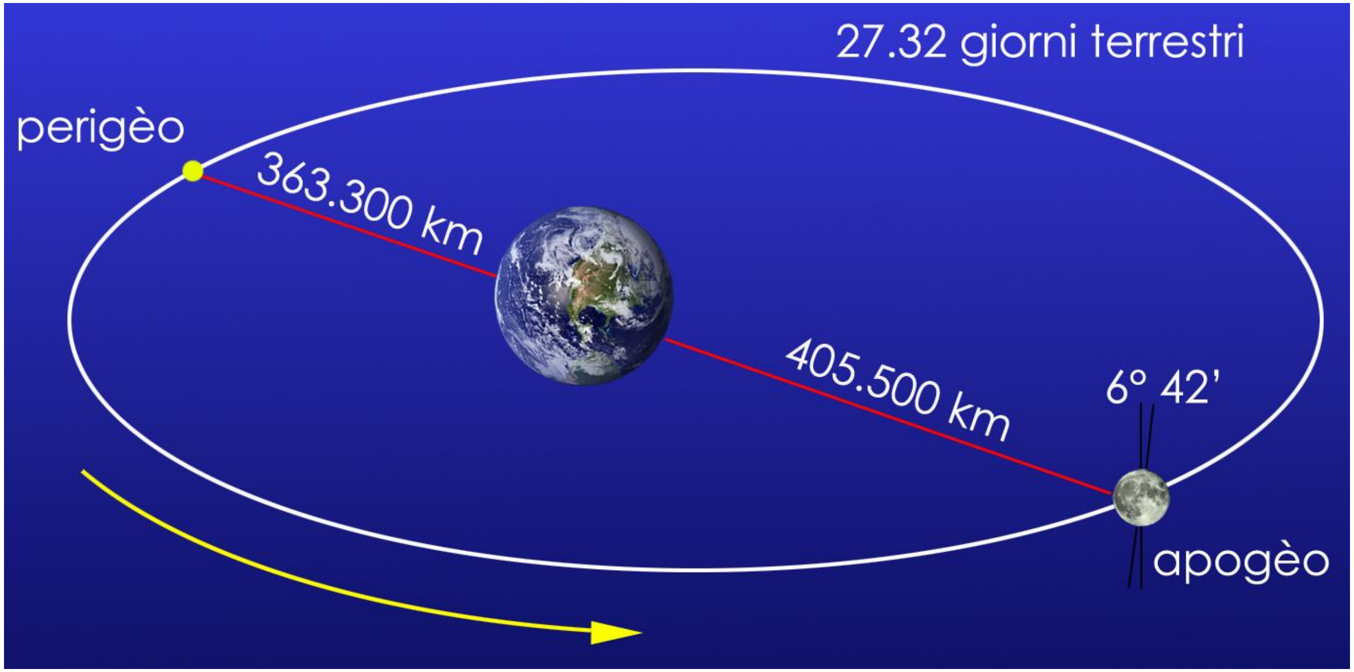
Il moto di 2 corpi che interagiscono attraverso la reciproca forza gravitazionale dipende dal rapporto delle loro masse:

- se le *masse sono uguali o simili*, entrambe i corpi ruotano attorno al *centro di massa del sistema*, ovvero alla *posizione media della distribuzione delle masse*. Un esempio è il moto di Plutone e del suo satellite Caronte: https://www.youtube.com/watch?v=fnvRXH__nqo

- per *masse molto diverse* possiamo *trascurare il moto della massa maggiore, e considerare la massa piccola in moto orbitale attorno alla grande*. In tal caso il centro di massa del sistema coincide col centro di massa del corpo grande. Un esempio è il sistema Sole-Terra-Luna: https://www.youtube.com/watch?v=UgpIy4tUjFI

Orbita della Luna attorno alla Terra

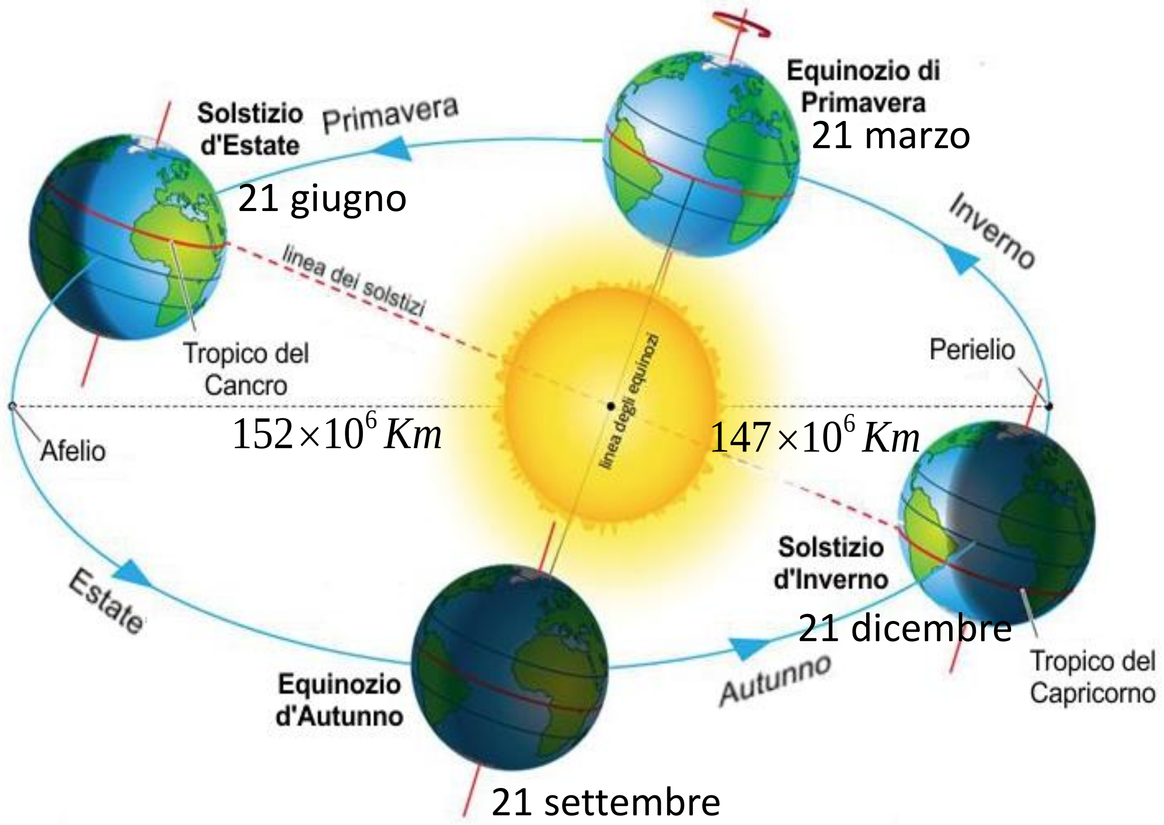
- Il moto della Luna attorno alla Terra non è esattamente circolare uniforme: la vera orbita lunare attorno alla Terra è l'ellisse, dunque Terra e Luna non sono sempre alla stessa distanza; la distanza è minima al perigeo, massima all'apogeo
- La distanza Terra-Luna, la velocità tangenziale, e l'accelerazione centripeta non sono quindi esattamente costanti in modulo; i valori considerati in approssimazione di moto circolare uniforme sono la MEDIA dei valori variabili ottenuti durante il moto



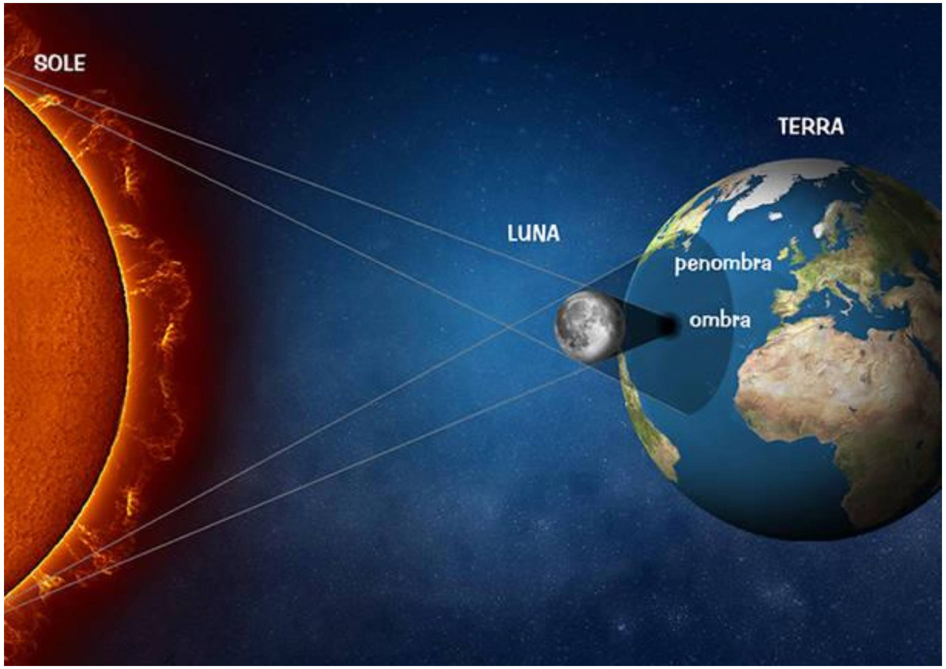
Orbita della Terra attorno al Sole

- La vera orbita terrestre attorno al Sole è un ellisse, dunque Sole e Terra non sono sempre alla stessa distanza; la distanza è minima al perielio, massima all'afelio
- L'inclinazione dell'asse terrestre (di circa 23°) rispetto al piano dell'ellissi genera le stagioni

- ✓ Equinozi (21 marzo e 21 settembre): i raggi solari sono perpendicolari all'Equatore
- ✓ Solstizio d'estate (21 giugno): i raggi sono perpendicolari al 23° parallelo di latitudine Nord (il Tropico del Cancro)
- ✓ Solstizio d'inverno (21 dicembre): i raggi sono perpendicolari al 23° parallelo Sud (Tropico del Capricorno)

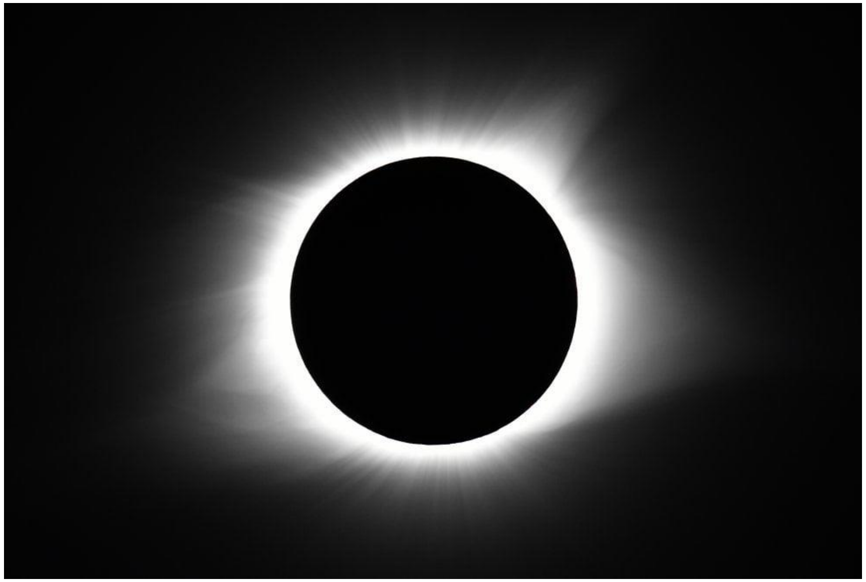


Eclissi di Sole

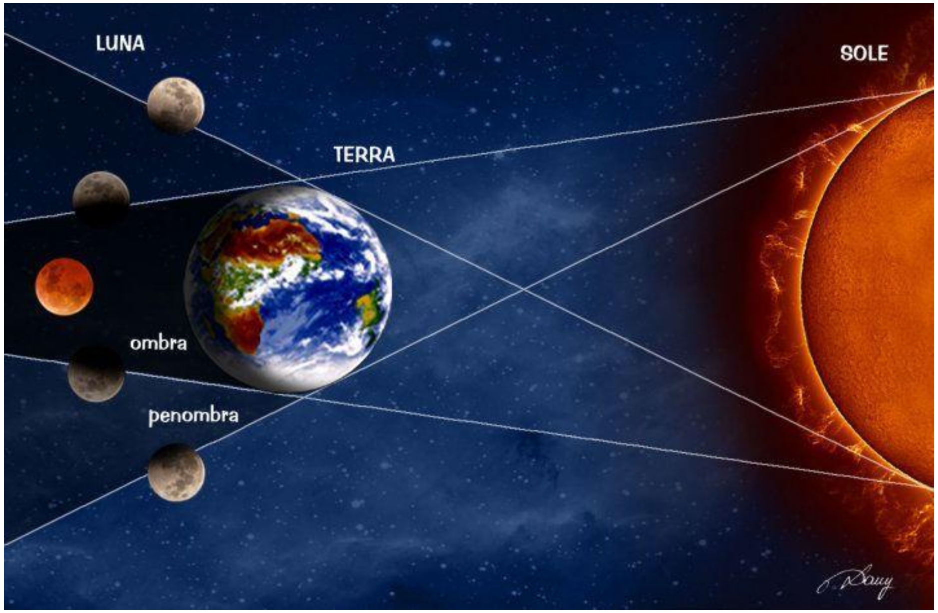


L'eclissi di Sole si ha quando la Luna, posizionata tra Sole e Terra, proietta sulla Terra il suo cono d'ombra

l'eclisse di Sole totale si ha quando la Luna è alla minima distanza dalla Terra (perigeo) ed il Sole alla massima distanza dalla Terra (afelio): in questo caso infatti il cono d'ombra proiettato dalla Luna è massimo



Eclissi di Luna

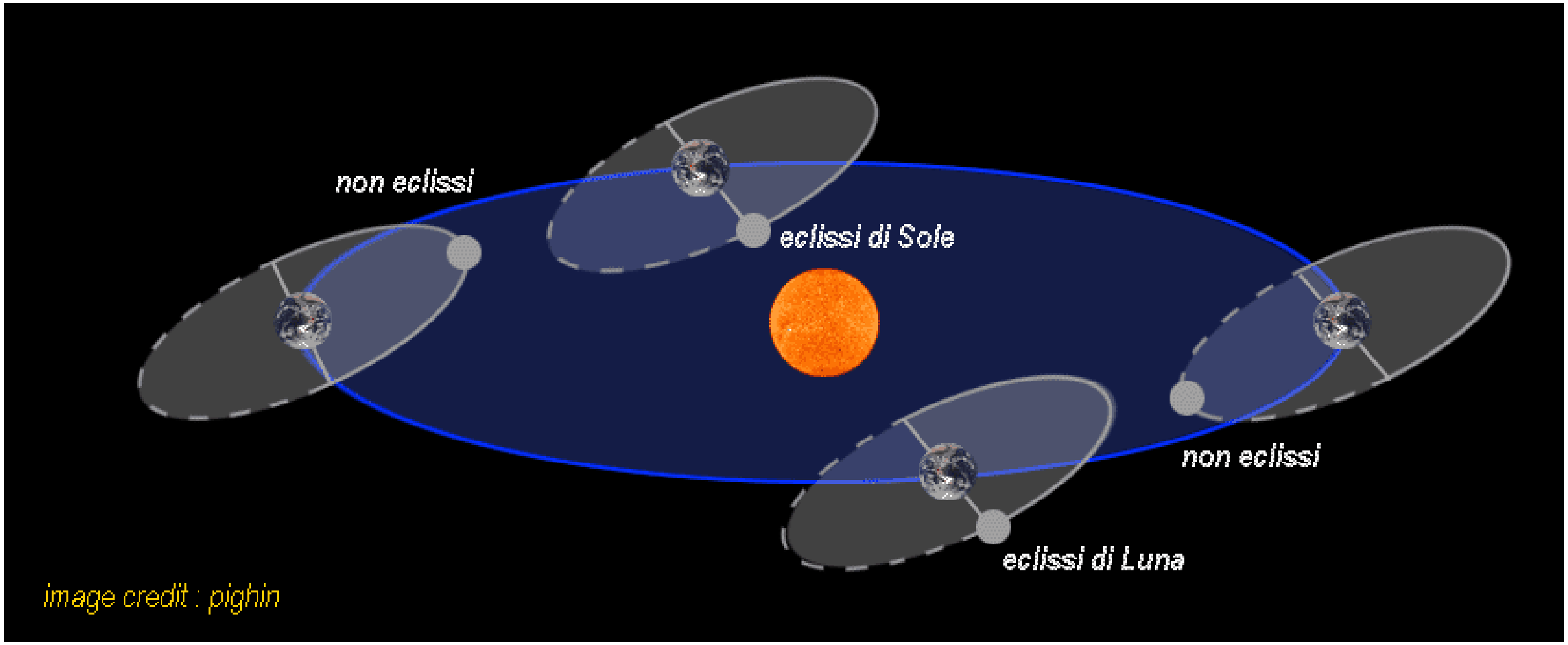


L'eclissi di Luna si ha quando la Terra, interposta tra Sole e Luna, proietta il suo cono d'ombra sulla Luna

Quando la Luna è interamente nel cono d'ombra della Terra, essa appare rossa ! Ciò succede a causa del fenomeno della diffusione della luce, spiegato da Rayleigh: la luce solare colpisce l'atmosfera terrestre e viene deviata in tutte le direzioni; alcuni di questi raggi luminosi (quelli rossi) raggiungono la Luna e la illuminano di rosso (lo capiremo meglio studiando l'ottica geometrica)

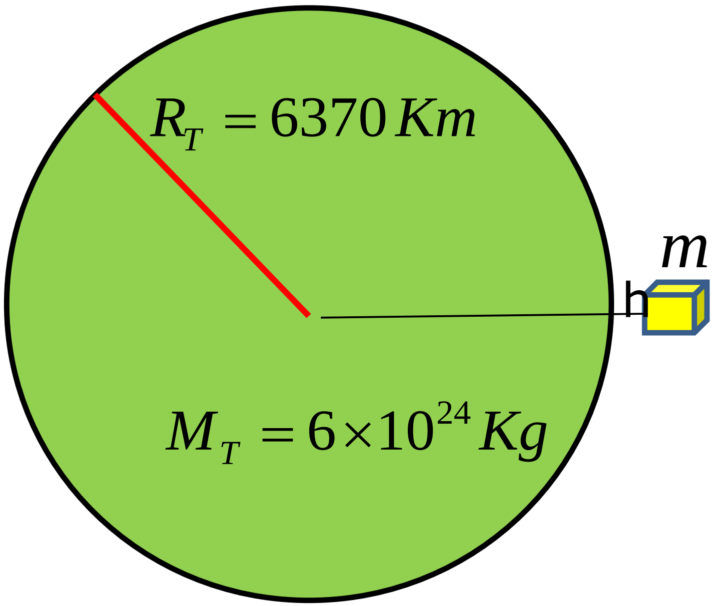
Eclissi

Se la Luna gira intorno alla Terra ogni 27 giorni, dovremmo avere un’eclissi di Sole ed un’eclissi di Luna ogni anno lunare. Ciò non succede poiché in realtà, il piano di rotazione della Luna attorno alla Terra è diverso da quello della Terra attorno al Sole, per cui l’allineamento perfetto Sole-Luna-Terra, o Sole-Terra-Luna avviene al massimo 4-5 volte in un anno solare



Forza di gravità terrestre

- Descriviamo la Terra come una sfera perfetta di raggio R_T = 6370 Km; chiaramente è un'approssimazione
- Consideriamo un oggetto di massa *m* posto ad un'altezza *h* dalla superficie terrestre; la distanza *R* tra il centro della Terra ed *m* è:



$$R = R_T + h$$

ai fini pratici *h* è così piccola rispetto ad R_T che possiamo certamente trascurarla; poniamo quindi:

$$R \simeq R_T$$

con questa approssimazione la forza di gravità esercitata dalla Terra su *m* diventa:

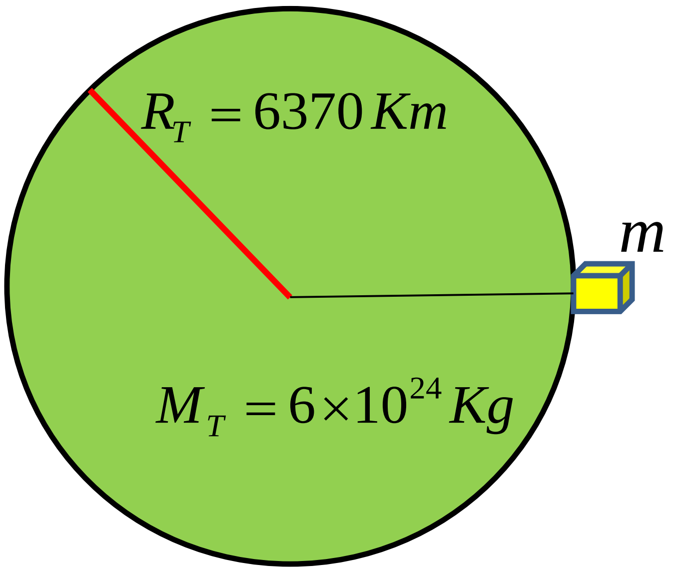
$$F = G\frac{mM_T}{{R_T}^2}$$

porre *h*=0 equivale a considerare i corpi come fossero appoggiati sulla superficie della Terra, descritta come una sfera perfetta

Accelerazione (campo) di gravità terrestre *g*

Utilizzando l'approssimazione di quota nulla (h=0) il campo di gravità generato dalla Terra, ovvero l'accelerazione subita dalla massa m è:

$$g = \frac{F}{m} = G\,\frac{M_T}{R_T^2}$$



l'accelerazione di gravità terrestre è indicata col simbolo *g*, al posto del consueto simbolo *a* che indica per una generica accelerazione. Si noti che *g* dipende dalla massa e dal raggio della Terra, che ovviamente sono valori costanti.

Dunque *g* è una costante, uguale per tutti i corpi presenti sulla superficie terrestre, e indipendente dalla distanza dell'oggetto dal suolo

Accelerazione di gravità terrestre

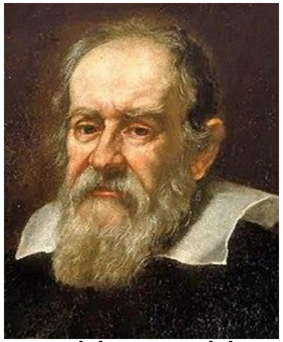
Calcoliamo g:

$$g = G\frac{M_T}{R_T^{\,2}} = 6.7\times10^{-11}\frac{N\,m^2}{Kg^2}\frac{6\times10^{24}\,Kg}{\left(6.4\times10^6\,m\right)^2} = 9.8\frac{m}{s^2}$$

- Il fatto che l'accelerazione (o campo) di gravità terrestre NON dipenda dalla massa del corpo accelerato ma soltanto dalla massa della Terra ribalta ancora una volta l'idea di Aristotele, per il quale il corpo più pesante doveva cadere più velocemente al suolo
- Galileo capì che Aristotele aveva torto un secolo prima che Newton mostrasse esplicitamente questo concetto attraverso la Legge di gravitazione universale: se lasciamo cadere due corpi diversi da una stessa altezza, essi avranno la stessa accelerazione di gravità; di conseguenza, istante per istante avranno anche stessa velocità e spostamento, e dunque giungeranno simultaneamente al suolo, indipendentemente dalla loro massa !!
- Ciò è vero in assenza di altri disturbi come vento e resistenza dell'aria

La Torre di Pisa, tra leggenda e realtà

Vincenzo Viviani, discepolo e segretario negli ultimi anni di vita di Galileo, ne trascrisse i ricordi, le elucubrazioni e gli sfoghi polemici, scrivendo infine la prima *biografia di Galileo*. Il libro è un appassionato rendiconto degli esperimenti del maestro, condito da numerose leggende, tra cui quella della torre di Pisa.



Galileo Galilei

Pisa 1564 – Arcetri 1642

Viviani racconta che Galileo salì sulla cima del campanile pendente dì Pisa e, « *con l'intervento delli altri lettori e filosofi e di tutta la scolaresca* » e « *con replicate esperienze* » mostrò che « *le velocità de' mobili dell'istessa materia, disegualmente gravi, movendosi per un istesso mezzo, non conservano altrimenti la proporzione delle gravità loro, assegnatagli da Aristotele, anzi che si muovon tutti con pari velocità* »

Nei suoi libri Galileo non menziona la Torre, ma riferisce dì esperimenti all'aperto con palla da cannone e una palla da moschetto, trovando come regola generale che esse cadono a terra nello stesso tempo. Che sia andato o meno sulla Torre, ciò che importa veramente fu la *rivoluzione concettuale che condusse Galileo a ribaltare l'idea Aristotelica secondo cui la velocità dei corpi indotta dalla gravità terrestre dipende al loro peso*

FORZA PESO

Si definisce FORZA PESO la forza esercitata dal campo gravitazionale terrestre sugli oggetti. Per un qualunque massa *M* presente sulla superficie terrestre, la forza di gravità con cui esso è attratto verso il centro della Terra è data dall'espressione:

$$F = M\ g$$

Poiché l'accelerazione di gravità *g* è la stessa per tutti i corpi, la forza di gravità è identificata unicamente dalla MASSA del corpo.
Calcoliamo la forza peso relativa ad 1 Kg materia:

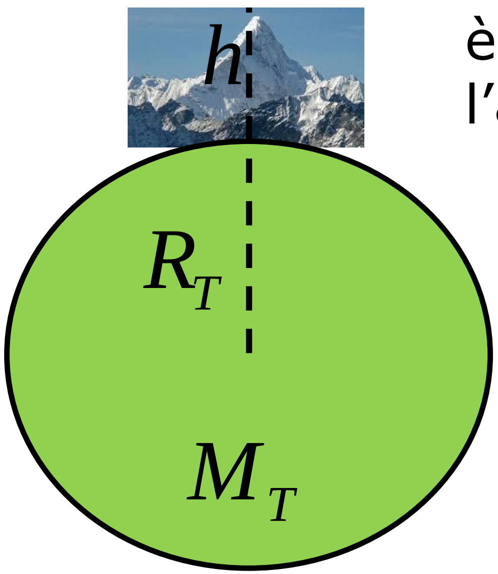
$$F = 1Kg \times 9.8\frac{m}{s^2} = 9.8\,N$$

In realtà la bilancia che misura la forza peso converte la scala da Newton a Kg dividendo la forza per g, per cui indica direttamente la massa:

$$\frac{F}{g} = M$$

Perciò comunemente si dice che la massa di 1 Kg 'pesa 1 Kg' e non che 'pesa 9.8 N' come a rigore si dovrebbe dire.

Gravità sull'Everest



Se andiamo sulla cima dell'Everest, è ancora vero che l'altezza *h* dal livello del mare uguale a 8848 m è trascurabile rispetto al raggio della terra ? l'accelerazione esatta, ottenuta includendo *h* , è:

$$a = G\frac{M_T}{\left(R_T + h\right)^2}$$

Calcoliamo il rapporto tra *g* e l'accelerazione calcolata sulla cima dell'Everest:

$$\frac{g}{a} = G\frac{M_T}{R_T{}^2}\frac{1}{G}\frac{\left(R_T + h\right)^2}{M_T} = \frac{\left(R_T + h\right)^2}{R_T{}^2} = \left(\frac{6370Km + 8.848Km}{6370Km}\right)^2 = 1.003$$

$$g = 1.003 \times a \qquad a = \frac{g}{1.003}$$

Sulla cima dell'Everest, l'accelerazione di gravità è diminuita rispetto all'accelerazione di gravità terrestre *g* dello 0.3%

Gravità sull'Everest

Consideriamo un uomo di massa M=100 Kg. Se si pesa a livello del mare ottiene (la bilancia riscala il valore della forza per *g*):

$$\frac{F}{g} = M = 100Kg$$

Poi va sulla cima dell'Everest con la bilancia, si pesa di nuovo e ottiene:

$$F = M\,a = M\,\frac{g}{1.003}$$

Ovviamente la bilancia, tarata per funzionare a livello del mare, segna:

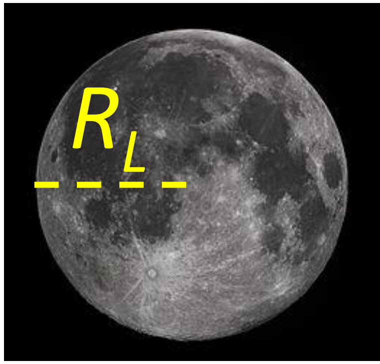
$$\frac{F}{g} = \frac{M}{1.003} = \frac{100Kg}{1.003} = 99.7\,Kg$$

L'uomo appare dimagrito di 3 etti, ma ovviamente è un dimagrimento finto: se calcoliamo *F/a* si trova sempre la stessa massa; ciò che è diminuito in cima all'Everest è la gravità, ovvero la forza peso.

Gravità della Luna

Calcoliamo il campo di gravità generato dalla Luna:

$$g_L = G\frac{M_L}{R_L^{\,2}}$$



$$g_L = 6.7\times10^{-11}\,\frac{N\,m^2}{Kg^2}\,\frac{7.3\times10^{22}\,Kg}{\left(1.74\times10^6\,m\right)^2} = 1.6\,\frac{m}{s^2}$$

R_L = 1737 Km
M_L=7.3x10^{22} Kg=
1.2% M_T

Poiché la gravità sulla Terra è 9.8 m/s^2, il loro rapporto è:

$$\frac{g_L}{g} \approx \frac{1}{6}$$

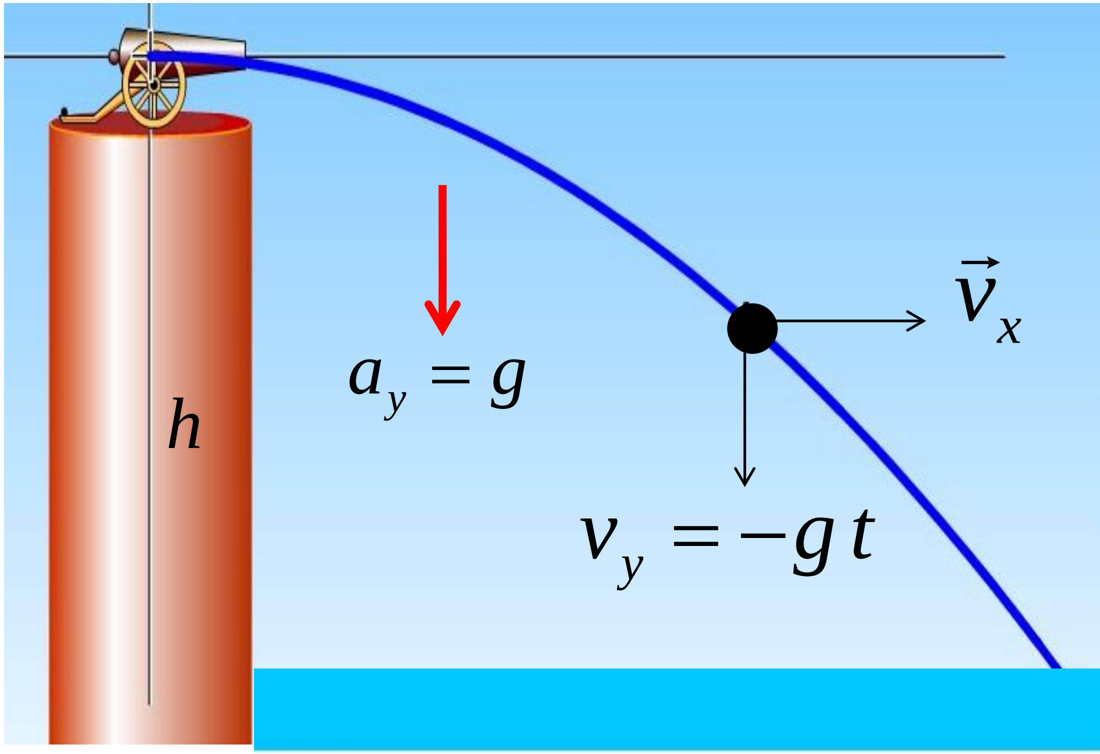
l'accelerazione di gravità sulla Luna è circa 6 volte minore di quella terrestre, per cui di un uomo di massa = 100 Kg sulla Luna avverte una forza peso di (100/6) Kg = 16.6 Kg; ovviamente la sua massa è sempre la stessa, ma è diminuita enormemente la gravità rispetto al suolo terrestre.

Moto parabolico

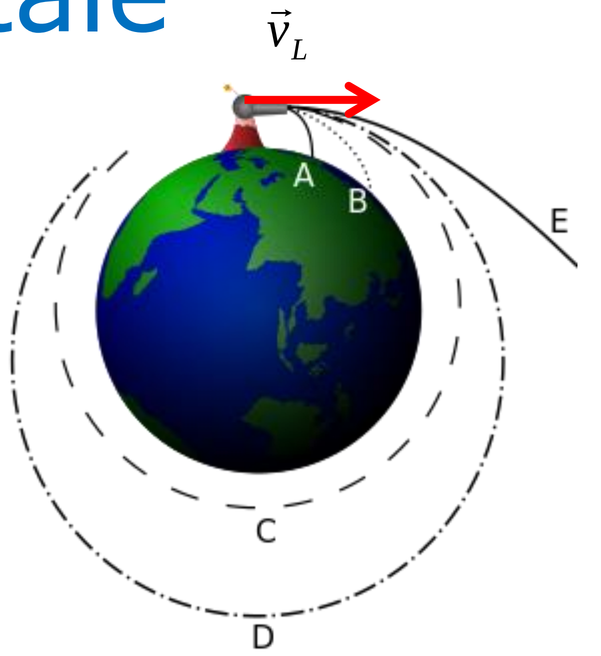
❑ Il moto parabolico è un moto uniformemente accelerato. Esempio: un cannone posto ad un'altezza *h* dal livello del mare spara palle di ferro con velocità $\boldsymbol{v}_x$ parallela al suolo; il proiettile è sottoposto all'azione della forza di gravità che imprime un'accelerazione uniforme in direzione verticale rivolta verso il basso, uguale in modulo all'accelerazione di gravità *g*

❑ La velocità orizzontale resta uguale a $\boldsymbol{v}_x$ lungo tutto il tragitto, mentre la velocità verticale orientata verso il basso $\boldsymbol{v}_y$ aumenta secondo la legge: $\boldsymbol{v}_y = g \cdot t$

❑ La traiettoria percorsa dall'oggetto è la parabola blu in figura



Traiettoria orbitale



Per comprendere il moto orbitale utilizziamo il 'cannone di Newton'. Dalla cima di una montagna spariamo palle di cannone in direzione orizzontale con velocità di lancio $\boldsymbol{v}_L$ crescente (trascuriamo l'attrito dell'aria)

- *A bassa* $\boldsymbol{v}_L$, la palla è attratta verso il centro dalla Terra e cade nel punto A con moto parabolico
- Aumentando $\boldsymbol{v}_L$ la palla raggiunge B
- Aumentando ancora, si raggiunge un valore tale che, *poiché la Terra si incurva sempre di più, la palla non riesce più a precipitare al suolo*, percorrendo quindi un'orbita chiusa circolare C. Per una data distanza dal centro della Terra, c'è una specifica velocità minima di lancio che produce un'orbita chiusa
- Con $\boldsymbol{v}_L$ sempre maggiori si ottengono orbite ellittiche come la D
- Aumentando ancora (caso E) si raggiunge *la velocità di fuga*: adesso la palla è troppo veloce per essere catturata in un'orbita chiusa; la gravità si limita a deviare la traiettoria della palla, che poi prosegue libera allontanandosi nello spazio

La navicella spaziale

- In fase di decollo la navicella viene messa in moto da potentissimi razzi (*motori a reazione*) che comunicano una forza e un'accelerazione enorme alla navicella, in modo che essa sfugga all'attrazione della forza di gravità terrestre. In questa fase la *forza apparente diretta verso il basso è enorme*, il pilota si sentirà *schiacciato verso il basso da una forza 2-3 volte maggiore della normale forza di gravità*

- Durante la fase di accelerazione la velocità aumenta progressivamente fino a raggiungere un valore abbastanza elevato da permettere alla navicella di sfuggire alla gravità *(velocità di fuga).* Raggiunta la velocità di fuga i razzi avranno esaurito il carburante, per cui si spengono si sganciano dall'abitacolo

- A distanza sufficientemente grande dalla Terra la forza di gravità diventa trascurabile; da quel momento in poi la navicella diventa un sistema inerziale, continuando a viaggiare nello spazio vuoto a velocità uniforme in assenza di forze applicate