

IL MOTO DELLA LUNA NELLO SPAZIO

Domanda : «La Luna è immobile?»

Risposta semplice: "No".



Nicolas Poussin (1594-1665) : Séléné et Endymion

Commento:

1. Sono frequentemente imbarazzato quando mi accingo a rispondere a domande che hanno una risposta così semplice. Delle volte ho l'impressione che si tratti di domande fatte a caso, tanto per far perder tempo. Con me non funziona: in fondo scrivo per me stesso, perché rispondo solo alle domande che mi offrono l'occasione di ripassare e approfondire soggetti che ho studiato a suo tempo. Se ciò può dare qualche idea corretta a chi non ne ha o ne ha di sbagliate (come sembrerebbe testimoniare ad esempio la forma – quanto meno incompleta - della domanda a cui tenterò ora di rispondere), ne sono lieto.

Altre volte penso che si tratti di domande trabocchetto, che implicano qualche tranello per cui chi risponde si espone alle ironie di chi ha posto la domanda. Devo dire che questo atteggiamento mi impressionerebbe ancora meno: so che le mie risposte sono in genere corrette, anche se possono essere incomplete. Infine ci sono quelli che mi hanno fatto notare più o meno indirettamente che ai lettori di Quora non interessano gli *“inutili tecnicismi”*. Penso che sia un'altra sciocchezza. Se ai lettori di Quora non interessano gli *inutili tecnicismi* (a) non devono fare o leggere domande le cui risposte, per essere complete, richiedono appunto i tecnicismi (altri ce l'hanno con i miei *“paroloni”*); (b) possono sempre fare a meno di leggere la risposta in parte o in tutto, oltre al *“NO”* iniziale, ma rendendosi almeno conto del fatto che le cose non sono affatto semplici, e plotoni di più o meno grandi astronomi vi hanno lavorato dal Seicento in qua: in questo caso, ad esempio, le ultime misure, fatte con laser, sono post-1969.

2. Luna immobile rispetto a cosa?

Premetto che non conosco nessuna popolazione e nessuno scienziato serio che abbia mai detto che la Luna è immobile, il che implicherebbe, per prima cosa, che sia la Terra a girarle intorno. Detto ciò, *il moto è sempre riferito rispetto a qualcosa, e l'immobilità pure.*

La Luna, o i Seleniti, suoi abitanti, se non considerassero tutte le precisazioni che farò, avrebbero tanto diritto quanto hanno creduto di averne i Terrestri per millenni, di considerarsi immobili e di poter descrivere il moto di ogni altro corpo celeste prendendo la Luna come immobile rispetto all'Universo intero. *Ne verrebbe una descrizione molto complicata, da un punto di vista cinematico, cioè dell'analisi pura e semplice dei movimenti, ma perfettamente accettabile.* Tuttavia, tale descrizione non sarebbe accettabile dal punto di vista della dinamica. Perché? La dinamica si interessa alle forze e alle accelerazioni, misurabili e inspiegabili se la Luna fosse il centro dell'universo, anche se essa, come la Terra, è un sistema con buona approssimazione inerziale, essendo dominata dall'attrazione gravitazionale (per i Seleniti) della Luna, e gli effetti più macroscopici delle altre accelerazioni non si vedrebbero senza apposite osservazioni e strumenti. Tuttavia, pur ammettendo che noi terrestri viviamo in epoca pre-Cinquecentesca, vedremo più avanti una dimostrazione del fatto che la Luna immobile non è. Ma limitiamoci a parlare per ora dei possibili sistemi di riferimento che aiutano a definire alcuni tradizionali movimenti della Luna.

*Qualcuno potrebbe dire che dopotutto abbiamo un sistema di riferimento universale, quello del **Fondo cosmico a microonde (Cosmic Microwave Background, CMB)**.* Se mi si dimostrasse che la Luna è immobile rispetto al CMB non sono ben sicuro che saprei come controbattere questa osservazione, tanto più che il satellite americano COBE, Cosmic Background Explorer (1989-1993) mostra chiaramente il modo del Sole rispetto a questo sistema di riferimento, la così detta *“anisotropia dipolare”* (Fig.1).

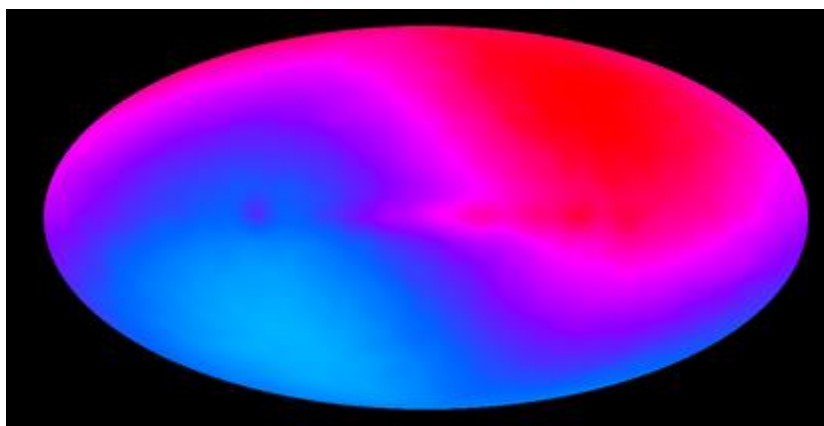


Fig.1

Per effetto Doppler, vediamo il fondo a microonde più caldo nella direzione verso cui ci muoviamo, e più freddo nella direzione opposta. Misure delicate hanno rivelato una velocità del sole rispetto al CMB di 368 ± 2 km/s, (applicando la formula $\Delta T/T = v/c$, da cui si vede che il ΔT , differenza di temperatura nelle due direzioni di massima e minima temperatura, deve essere di millesimi di grado Kelvin) in direzione di un punto di coordinate (galattiche) $l = 263.85^\circ$ e $b = 48.25^\circ$ (<http://www.astro.ucla.edu/~wright/CMB-DT.html>).

Ma la Luna non ha mai velocità zero rispetto al CMB, perché la sua velocità nella sua orbita circumterrestre è di circa 1 km/s, e la velocità della Terra nell'orbita circumsolare è circa 30 km/s, per cui **la velocità della Luna rispetto al CMB non è mai inferiore a circa 337 km/s nel corso dell'anno e presenta una variazione stagionale**. Quindi, *se questo sistema di riferimento fosse accettato come "riferimento universale" la Luna non sarebbe immobile rispetto ad esso*. Sono stati proposti anche altri sistemi di riferimento universali da cui si deduce comunque che la velocità del sole è circa 1000 km/s, e lo stesso ragionamento si applicherebbe: che sia il Sole a ruotare intorno alla Luna o viceversa, è chiaro che nello spazio Sole, Terra, Luna viaggiano insieme.

3. I primi tre movimenti (traslazione rispetto al CMB, rivoluzione circumterrestre, traslazione rispetto al Sole).

Dunque, la Luna, come si è detto, oltre a non essere immobile rispetto al CMB, (337-399 km/s secondo le stagioni), non è immobile rispetto alla Terra (**moto di rivoluzione, 1 km/s, (1)**), e non è immobile rispetto al Sole, seguendo la Terra nel suo moto di rivoluzione intorno al Sole (**moto di traslazione, 31 km/s**).

Del moto di traslazione rispetto al Sole, occorre dire che esso è frequentemente mal interpretato. Tanto frequentemente, che molti anni fa, all'esame di "Cultura Generale" in Fisica (l'ultimo esame prima della Laurea) nella mia Università, quando uno dei vari insegnanti voleva impallinare il laureando, gli chiedeva appunto di disegnare il moto della Luna intorno al Sole tenendo conto del moto della Terra. Ne veniva normalmente un disegno di questo genere:

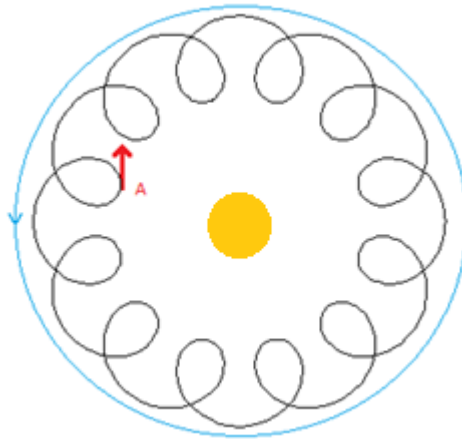


Fig.2

In cui in blu è indicata la direzione generale del moto di Terra e Luna intorno al Sole. Ma, come abbiamo visto, la Luna ha una velocità di 1 km/s intorno alla Terra e la Terra di circa 30 km/s intorno al Sole, e quindi *la Luna, nella sua rivoluzione intorno al Sole, non può mai andare all'indietro rispetto alla Terra e rispetto al Sole, cioè il moto in A è impossibile.*

Qualcuno, più astuto, proponeva invece (Fig.3):

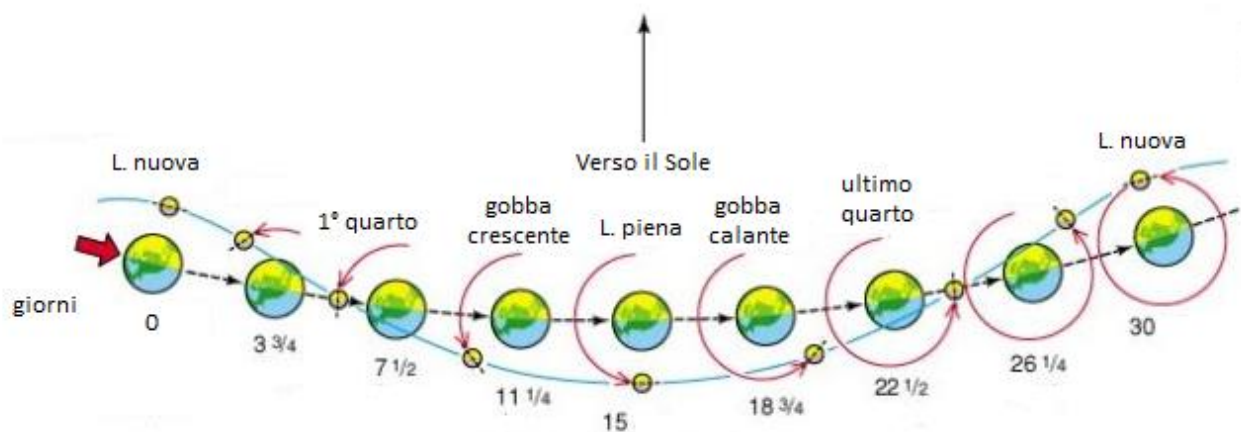


Fig.3

Era un disegno corretto??

No, giammai – e questo pochi lo sanno. L'orbita "composita" della Luna deve mostrare sempre una concavità verso il sole, e mai una convessità (che invece appare nella figura precedente nelle due posizioni di Luna nuova). Il disegno corretto è quindi:

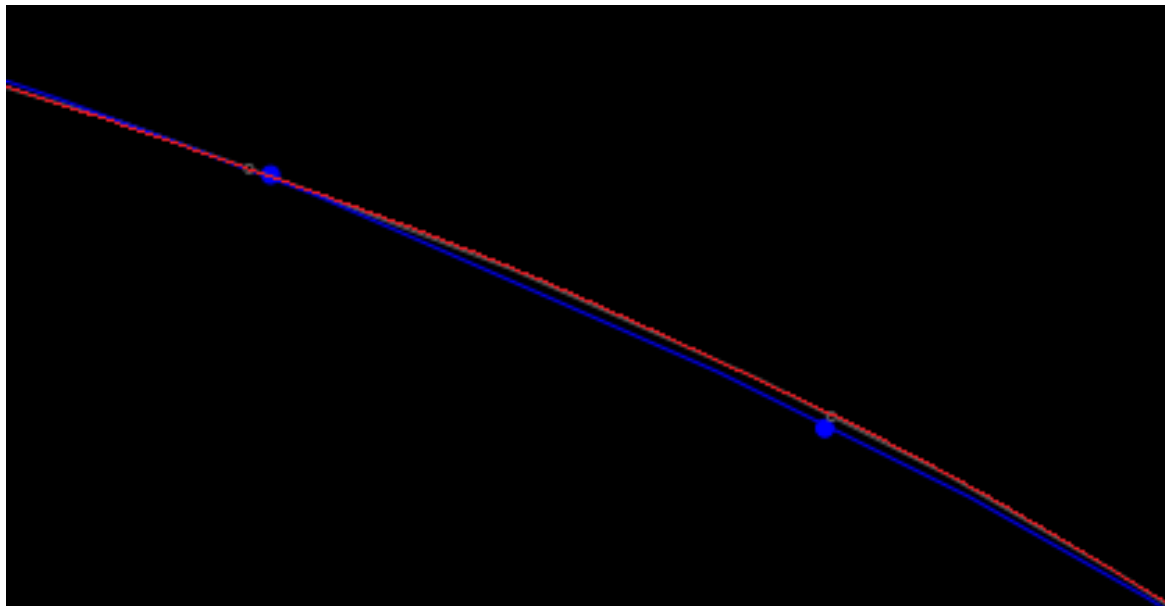


Fig.4

Schema tratto da https://en.wikipedia.org/wiki/Orbit_of_the_Moon. La linea tracciata in blu rappresenta l'orbita della Terra, quella tracciata in rosso rappresenta l'orbita della Luna. Grossolanamente parlando, l'orbita è concava nella parte rivolta al corpo celeste verso il quale sta "prevalentemente cascando".

Fare un disegno del genere, sia pure approssimato, è abbastanza difficile, ma ci si arriva con una breve riflessione: si disegni un cerchio (l'orbita della Terra, che con ottima approssimazione è un cerchio, qui in colore arancio), e un dodecagono del quale il cerchio interseca ogni lato in due punti:

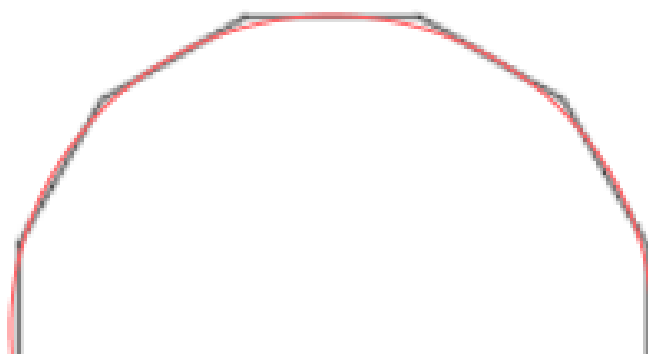


Fig.5

Dopodiché si smussino gli angoli del dodecagono, ciò che non ho fatto.. Il cerchio (arancio) sarà una buona rappresentazione dell'orbita terrestre, il dodecagono (nero) smussato rappresenterà l'orbita lunare.

Dimostrazione? *Per chi adora i tecnicismi*: occorre solo dimostrare che la forza centrifuga sulla Luna dovuta al Sole è maggiore della forza centrifuga dovuta alla Terra. Nel punto in cui le due forze centrifughe sono opposte, cioè nel punto in cui la Luna si trova tra il Sole e la Terra, per avere una concavità rivolta verso il Sole dobbiamo avere,

$$\Omega^2 R > \omega^2 r$$

Ω e ω sono le velocità angolari, R e r le distanze riferite a Sole e Terra rispettivamente. M e m saranno le due masse.

Questo ci dà una relazione fra r e R , perché, per orbite circolari quali quella della Terra (eccentricità 0.017), e, un po' meno, quella della Luna (con eccentricità 0.055), vale l'uguaglianza "forza gravitazionale = (pseudo) forza centrifuga", che, introducendo altre approssimazioni, diventa, per il sistema Sole-Luna e per il sistema Terra-Luna:

$\Omega^2 R = GM/R^2$ e $\omega^2 r = Gm/r^2$, da cui $\frac{M}{R^2} > \frac{m}{r^2}$, condizione per avere una concavità rivolta verso il sole, che si riduce a

$$\frac{r}{R} > \sqrt{\frac{m}{M}} = 0.0017$$

Moltiplicando per R (= 1 unità astronomica, a cui è circa eguale R) si trova che basta che la distanza Luna-Terra sia superiore a 260 000 km per avere una concavità rivolta verso il Sole. La distanza della Luna dalla Terra è 384 500 km. Quindi...

Si noti che la forza attrattiva del Sole sulla Luna è doppia dell'attrazione terrestre, come si trova subito facendo il rapporto $(\frac{M}{R^2})/(\frac{m}{r^2})$. Si potrebbe dire che l'orbita lunare è un'orbita intorno al Sole perturbata dall'attrazione terrestre, non viceversa.

4. Altri movimenti della Luna che comportano spostamenti della medesima, o loro modificazioni.

Oltre a questi tre più o meno ovvi movimenti, la Luna ne ha altri. Essi sono in massima parte retti dalle tre "Leggi di Cassini" (1693), vedi Wikipedia. Tuttavia tali leggi sono insufficienti a spiegare tutte le finezze del moto lunare.

Camille Flammarion, nel suo classico "Astronomie populaire" del 1880, scriveva: "Il movimento della Luna nello spazio è ancora più complicato di quello della Terra!", per il quale aveva elencato non meno di dieci "moti componenti" differenti. Alla faccia dell'immobilità, centoquaranta anni fa!

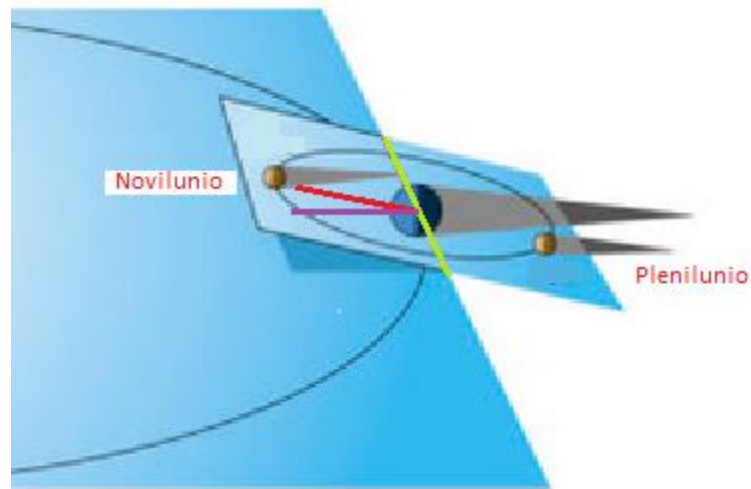


Fig.6

Limitandosi alle particolarità più curiose, Flammarion notava che:

a) La luna non muove sul piano dell'orbita terrestre, o piano dell'eclittica, ma su un piano inclinato di circa 5 gradi rispetto a quello dell'eclittica. Questo, incidentalmente, è ciò che evita che ci sia un'eclisse **di Sole** ad ogni novilunio, Luna tra Terra e Sole, che sarebbe a sinistra della figura, e una **di Luna** ad ogni plenilunio, Luna dalla parte opposta (vedi Figura 6). Inoltre, questa inclinazione permette ai Terrestri di vedere un poco della "faccia nascosta della Luna" oltre i due poli. In figura 6, *che non vale per tutto l'anno e per sempre*, come vedremo, al plenilunio si vede la Luna dal di sopra, sbirciando oltre il Polo Nord, e al novilunio la si vede dal di sotto, sbirciando oltre il Polo Sud.

Ma l'inclinazione del piano dell'orbita lunare varia di circa diciassette minuti primi ($5^{\circ}0' - 5^{\circ}17'$) con ciclo di 153 giorni. **E questo è un quarto movimento.** In Figura 6, l'angolo fra il semiasse maggiore dell'ellisse lunare (rosso) e la sua proiezione (viola) sul piano dell'eclittica, è poco più di cinque gradi, e oscilla rispetto ad esso con una semi-ampiezza di circa 8 minuti primi.

b) La linea di intersezione del piano dell'eclittica e del piano dell'orbita lunare è detta linea dei nodi ed è segnata in verde in Fig.6. Ma *la linea dei nodi* non è fissa nello spazio. Essa compie un giro completo dell'eclittica in 6793 giorni, 18 anni e $\frac{2}{3}$. **E questo è un quinto movimento.**

c) L'ellisse disegnata dalla luna sul suo piano non è fissa, ma il suo asse maggiore (rosso) fa un giro completo in 3232 giorni, 8.85 anni (nel senso del moto della Luna sulla sua orbita). **E questo è un sesto movimento.**

d) L'eccentricità dell'orbita lunare varia. **E questo è un settimo movimento.**

Ma l'eccentricità dell'orbita lunare intorno alla Terra, fa sì che al perigeo, mentre la rotazione lunare è costante, la velocità della luna sulla sua orbita sia maggiore che all'apogeo (seconda legge di Kepler). Al perigeo, quindi, la luna *appare* ruotare più lentamente, il che ci permette di vedere qualcosa di più di metà della superficie lunare. L'effetto del ritardo apparente della rotazione (la linea azzurra), rispetto alla rotazione attesa (linea rossa) permette ad un osservatore situato nel fuoco prossimo dell'ellisse di vedere un poco di più della superficie lunare sul lato orientale della Luna, una fetta di circa 7.7 gradi (il ritardo è molto esagerato in figura, a scopo illustrativo). L'opposto avviene all'apogeo.

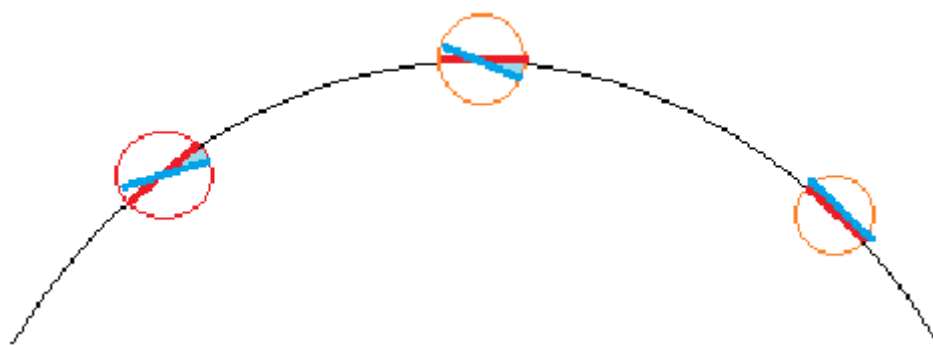


Fig-7, situazione al perigeo.

Se noi guardassimo la Luna come fissa nello spazio, la vedremmo oscillare per questo motivo intorno al suo asse verticale, con periodo annuo, mostrandoci qualcosa della "faccia nascosta" verso Oriente al perigeo, e qualcosa verso Occidente all'apogeo: questa oscillazione viene detta librazione "Est-Ovest". *Ma, onestamente, non potremmo considerare questo un ulteriore moto della Luna.* Sarebbe un moto apparente dovuto alla combinazione di due moti regolari: una rotazione regolare della Luna intorno al suo asse, e la seconda legge di Kepler applicata all'orbita lunare. Lo stesso vale per la librazione "Nord-Sud" già trattata, che dipende dall'inclinazione del piano su cui la Luna orbita intorno alla Terra.

Entrambe queste librations hanno però una piccola componente "fisica", oltre alla grande componente "apparente". Si tratta di una librazione "Nord-Sud", meglio detta *nutazione*, di un grado e mezzo; e una librazione "Est-Ovest" di un quarto di minuto d'arco, per osservare la quale sono state necessarie misure con riflessione Laser. Le due librations fisiche trovano la loro spiegazione nella complessa teoria del moto dei corpi rigidi rotanti: in particolare, la "nutazione" la si vede nelle trottole quando perdono velocità e abbandonano la rotazione intorno a un asse rigorosamente verticale.

A questo punto il Flammarion stesso getta la spugna e menziona un'insalata di altri movimenti, dicendone solo il nome senza specificare come si manifestino. Secondo lui,

basta sapere che queste variazioni di movimenti, o movimenti secondari, esistono. Mi adeguo.

Essi sono:

- L'*evezione* (con periodicità di 32 giorni);
- L'*equazione del centro*, la cui oscillazione ha periodo mensile;
- La *variazione*, con periodo di 15 giorni;
- La *variazione annuale*, con periodo di un anno;
- L'*equazione parallattica*, con periodo di 29 giorni....

Si tratta di concetti che il curioso può reperire in rete, magari per scoprire che sono moti apparenti, o moti già noti da questo stesso post, in tutto o in parte, con altri nomi.

In tutto, conclude Flammarion, le irregolarità del moto lunare, *che da un altro punto di vista possono essere considerate come movimenti secondari che si sovrappongono al movimento orbitale principale, sono circa sessanta*. Ai suoi tempi non molti di questi moti addizionali erano spiegati in modo da tutti accettato.

5. La rotazione della Luna intorno al suo asse.

Resta comunque un ultimo moto da contemplare. Si tratta della rotazione della Luna intorno al suo asse (2). E' facile dimostrare che questo moto di rotazione avviene, e quindi la Luna non è immobile.

I. Se la Luna fosse immobile (cioè non ruotasse, perché anche questo è un movimento) noi che guardiamo dalla Terra ruotandole attorno vedremmo l'intera superficie lunare (Fig.8a). Poiché invece vediamo (poco più di) metà della sua superficie (Fig.8b), ciò vuol dire che la nostra velocità di rivoluzione intorno alla Luna è uguale alla velocità di rotazione della medesima, il che prova in modo definitivo che la Luna non è immobile, ma quanto meno ruota intorno al suo asse.

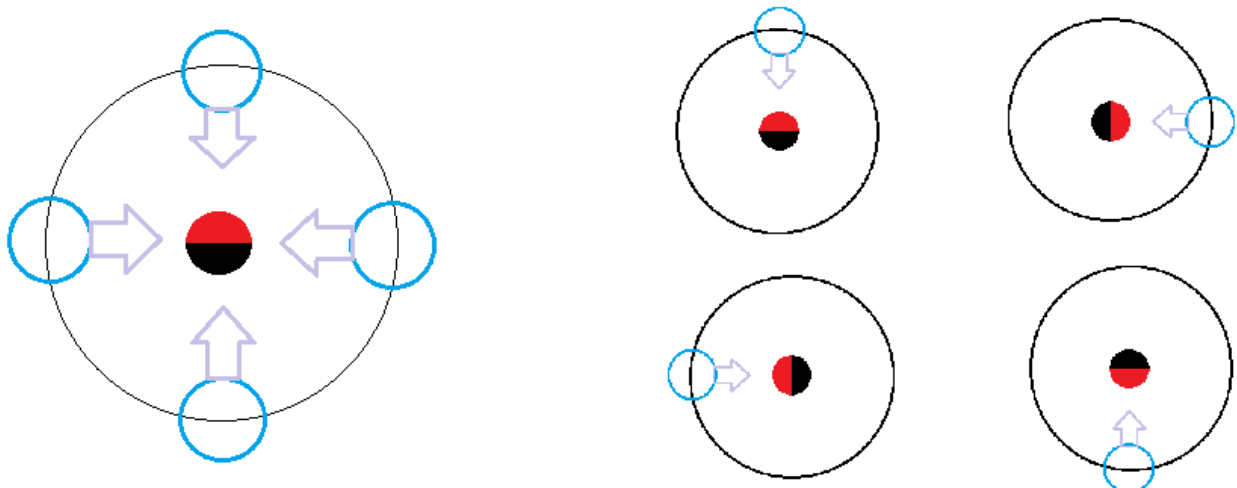


Fig.8a

Fig.8b

Dalla Fig. 8a (in cui la Terra, azzurra, ruota intorno alla Luna – **che non ruota**) si può concludere che l'osservatore nel corso di un mese vedrebbe l'intera superficie lunare: la parte rossa a dodici ore, la parte nera a sei ore, e porzioni intermedie a tre e ventun ore. **Se invece la Luna ruotasse intorno al proprio asse**, con periodo uguale a quello di rivoluzione della Terra intorno a lei, (Fig. 8b), la Terra vedrebbe sempre la stessa faccia, come osserviamo.

Lo stesso avverrebbe se (come crediamo) la Luna rivolgesse intorno alla Terra: per mostrare alla Terra sempre la stessa faccia, essa deve ruotare intorno al suo asse con periodo eguale al suo periodo di rivoluzione intorno alla Terra.

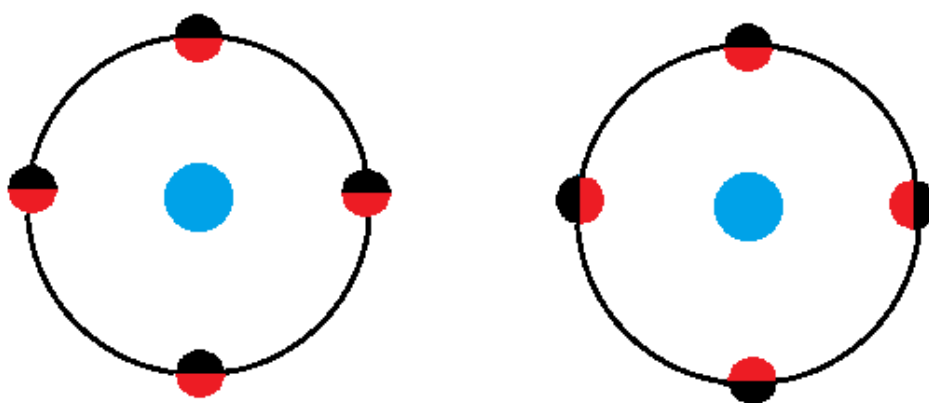


Fig. 9

A sinistra, la Luna non ruota intorno al proprio asse. La Terra ne può quindi contemplare l'intera superficie.
A destra la Luna ruota e la Terra ne vede sempre la stessa faccia, come avviene in realtà.

Si è già notato che la nutazione modifica, sia pure di poco, la semplice rotazione della Luna intorno al proprio asse. Ho fatto qualche ricerca e non ho trovato indicazioni di altri fattori perturbanti dovuti alle peculiarità del moto dei corpi rigidi.

Quanto meno, però, la Luna ha già – quasi - completato un ulteriore movimento che, grazie all'effetto delle maree, doveva portarla a far coincidere il suo moto di rotazione con quello di rivoluzione intorno alla Terra.

6. Le maree e le loro principali conseguenze sul moto lunare.

La ragione per cui il periodo di rotazione della Luna è eguale al suo periodo orbitale, è da ricercarsi appunto nell'effetto delle maree, cioè, in ultima analisi, nella non-uniformità del campo gravitazionale terrestre. Anche la Luna, come è noto, crea maree sulla Terra. Le maree degli oceani sono le più visibili, ma ci sono anche azioni, meno visibili ma più

importanti, sulla porzione solida della Terra. Poiché il mese lunare è più lungo di un giorno terrestre, la Luna esercita una coppia che tende a rallentare la rotazione terrestre. Il momento angolare del sistema Terra-Luna è conservato e quindi il momento angolare perso dalla Terra viene trasferito alla Luna. Di conseguenza, la Luna si allontana (di circa 38 mm/anno – altre misure dicono 2 cm), e quindi rallenta il moto sulla sua orbita, mentre il giorno terrestre si allunga (15 microsecondi all'anno, da confrontarsi con il secondo ogni centomila anni già menzionato dal Flammarion).

Se non interverranno altri fattori, si arriverà ad una situazione in cui la durata del giorno terrestre sarà eguale alla durata del mese lunare, che per conto suo è già pari alla durata del giorno lunare. Una delle teorie prevede che quando ciò avverrà, tutti i periodi saranno di circa 55 giorni e la distanza Terra-Luna sarà di 612000 km – tra qualche miliardo di anni. <https://www.cliffsnotes.com/study-guides/astronomy/earth-and-its-moon/evolution-of-the-earth-moon-system>.

Un simile effetto si è già verificato, a quanto pare, per il sistema Plutone-Charonte (ammesso che Plutone sia un pianeta).

6. Conclusione

Come annunciato, la luna NON è immobile rispetto a nessun sistema di riferimento: come minimo ruota intorno al proprio asse, ma in realtà possiede un moto ben più complicato.

NOTE

(1) Periodo di rivoluzione intorno alla Terra: *sidereo* (rispetto alle stelle fisse) 27.321661 d o giorni; (27 d 7 h 43 min 11.5 s); periodo *sinodico*: 29.530589 d; (29 d 12 h 44 min 2.9 s). Il periodo sinodico è il tempo necessario perché la Luna mostri alla Terra la stessa fase.

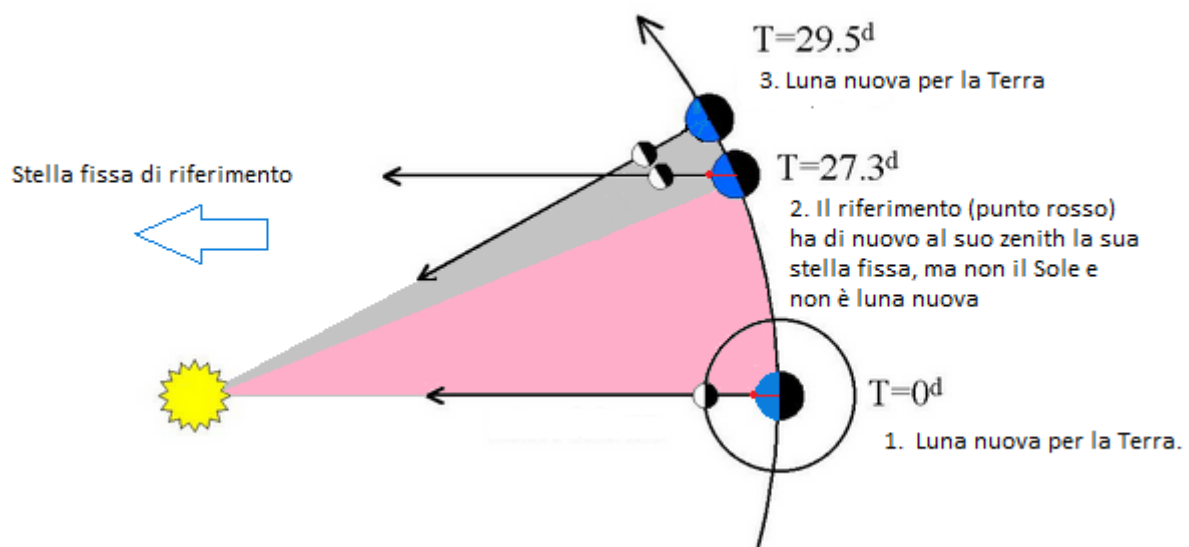


Fig.10

Si suppone che le misure siano fatte a mezzogiorno. Per la Luna questo ha poco valore, perché la sua rotazione è assai lenta; per la Terra invece sì. Il senso del moto di rotazione è segnato in verde. Nella posizione (1) abbiamo il novilunio per la Terra (Luna tra Terra e Sole), mentre un punto di riferimento all'Equatore (segnato in rosso) ha al suo zenith una data stella fissa. Nella posizione 2, avendo percorso il settore rosa, il punto rosso di riferimento ha di nuovo al suo zenith la sua stella fissa, ma per la Terra non siamo ancora al plenilunio. Nella posizione 3, avendo anche percorso il settore grigio (qui fortemente esagerato), si riproduce il novilunio per la Terra. Il punto rosso non ha più allo zenith la sua stella. Il tempo impiegato a percorrere l'arco sotteso dal settore rosa è il periodo sidereo; il tempo impiegato a percorrere l'arco sotteso dal settore rosa + il settore grigio è il periodo sinodico, che quindi è più lungo.

(2) **Periodo di rotazione lunare intorno al proprio asse** rispetto alle stelle fisse (sidereo): 27.321661 d. Si noti che mentre l'asse di rotazione terrestre è inclinato di $23^{\circ}27'$, quello della Luna è inclinato di 1.5424° rispetto al piano dell'eclittica (su cui si muove la Terra); 6.687° rispetto al piano della propria orbita; 24° rispetto all'Equatore terrestre.