

## La candela

Dopo la parentesi della volta scorsa, torniamo a parlare di maree. Abbiamo visto che se ne occupa Keplero, chiamando in causa un qualche magnetismo della Luna sulla materia terrestre: spiegazione che anticipa quella basata sulla gravitazione, che Newton darà alcuni decenni dopo. Abbiamo anche ricordato che la spiegazione kepleriana non va assolutamente a genio a Galileo, il quale è filosoficamente contrario a simili “proprietà occulte.” Galileo propende per una spiegazione dinamica, ossia dovuta alle particolarità del moto della Terra; ma vi ho già spiegato che purtroppo la spiegazione di Galileo è sbagliata quanto ingegnosa.

Ho già detto che è Newton, nei *Principia*, a dare per primo una vera teoria delle maree, anche se passerà ancora molto tempo prima che se ne capiscano tutte le complicate e variate modalità. Un importante contributo lo dobbiamo a George Darwin, figlio del più famoso Charles. Infine una visione totalmente nuova del fenomeno (che non ne cambia la sostanza, ma rivoluziona il paradigma interpretativo, riavvicinandolo per qualche verso a Galileo) discende dalla relatività generale di Einstein.

Il ragionamento di Newton parte da un’idea per noi oggi del tutto naturale, ma esattamente del genere che Galileo non riusciva ad accettare: la *gravitazione universale*. Per Galileo il magnetismo di Keplero appare addirittura una “fanciullezza”; ma lo stesso Newton è consapevole che un’azione a distanza presenta delle difficoltà filosofiche (ed è infatti il motivo centrale dell’opposizione cartesiana a Newton) e ciò motiva la sua famosa frase: “hypotheses non fingo.” Ovvero: non so dire che cosa ci sia sotto, ma ammettendo che esista un’attrazione universale fra tutte le masse dell’Universo sono in grado di spiegare una quantità di cose.

Restando alle maree, la Luna attrae non solo la Terra nel suo insieme, ma ciascuna sua parte; e se queste parti — come nel caso delle acque — sono libere di muoversi, si sposteranno nella direzione della forza di attrazione. Sembra chiaro e semplice, eppure il discorso fatto così non funziona. Infatti non spiega come mai ci siano *due* alte maree: una dalla parte della Luna, e una dalla parte opposta. Osservo per inciso che è proprio su questo punto che moltissimi testi che cercano di dare una spiegazione elementare delle maree cadono in fallo miseramente. Un suggerimento: date un’occhiata al testo che avete adottato. Sono pronto a scommettere un pranzo con ciascuna delle mie lettrici (o lettori).

Ma prima di addentrarci nel problema, faccio notare una cosa: anche il Sole produce maree. Sebbene sia molto più lontano della Luna, ha anche una massa assai maggiore, e i due effetti giocano in modo tale che la marea dovuta

al Sole è quasi la metà di quella dovuta alla Luna. La conseguenza è che Sole e Luna possono cooperare oppure opporsi l'un l'altra, a seconda delle rispettive posizioni: se le alte maree lunari e solari capitano allo stesso momento, la marea risultante è più alta; se viceversa un'alta marea lunare coincide con una bassa marea solare, le due maree si sottraggono, ma vince quella della Luna. Complessivamente perciò il ciclo delle maree segue il moto della Luna, ma con oscillazioni importanti a seconda della posizione del Sole.

Più precisamente, le maree lunare e solare si sommano alle sizigie, ossia quando Sole, Terra e Luna sono all'incirca allineate (luna piena oppure luna nuova); si sottraggono alle quadrature (primo e ultimo quarto). Su questa stessa base si spiegano anche gli effetti stagionali, ma è meglio non complicare troppo le cose.

Il fatto che le maree siano tanto diverse da luogo a luogo, e avvengano perfino a tempi diversi, era troppo anche per Newton, e sarebbe stato spiegato solo nell'800 e oltre. Abbiamo di nuovo a che fare con un esempio della necessità di cominciare a studiare fenomeni semplici e magari semplificati, pena l'impossibilità di capire. Infatti Newton ragiona (senza dirlo) come se tutta la Terra fosse ricoperta da un'unica massa oceanica. L'effetto delle diverse profondità, dei continenti, degli stretti, dei mari chiusi o quasi, richiedeva conoscenze più avanzate e il possesso di strumenti matematici che sarebbero venuti dopo.

Riprendo il filo del discorso. Se la marea è dovuta (prevalentemente) all'attrazione lunare sull'acqua, perché ci sono *due* alte maree al giorno: una all'incirca quando la Luna è al meridiano, l'altra dodici ore dopo? (Ho scritto "all'incirca" perché in realtà, come avevo già osservato nella prima puntata, l'ora dell'alta marea varia da luogo a luogo, e può essere anche parecchio distante da quella che ci si aspetterebbe.)

La spiegazione è che la marea è un effetto *differenziale*. Ho usato "una tantum" un termine di gergo, per illustrare una cosa che vi è certo ben nota in altri campi: i termini di gergo hanno una funzione, in quanto (e solo quando) descrivono in modo immediato ciò che si potrebbe spiegare per disteso solo con un discorso più lungo. Vediamo che cosa vuol dire qui "differenziale."

La Luna attrae ogni parte della Terra: sia la massa solida (più o meno solida, in realtà) sia quella liquida. La massa solida è approssimativamente sferica, e sappiamo che la forza totale di attrazione si calcola come se tutta la massa fosse raccolta nel centro della Terra. Sotto l'azione di questa forza la Terra "cade" verso la Luna: intendo dire che non può restare ferma, ma deve avere un moto accelerato; di fatto non cade in senso stretto, ma descrive una traiettoria pressoché circolare, intorno al centro di massa comune a Terra e Luna. Per la cronaca, il raggio di questa circonferenza è un po' meno di 4700 km.

Consideriamo ora una porzione di oceano che si trovi proprio sotto la Luna: dato che la sua distanza dalla Luna è minore, la forza di attrazione sarà maggiore, e quindi maggiore sarebbe la sua accelerazione, *se fosse libera di muoversi*.

Però l'acqua è attratta anche dalla Terra, per cui è obbligata a muoversi con la Terra, con la stessa accelerazione di questa. La forza di attrazione in eccesso (la differenza, da cui "differenziale"), che è diretta verso la Luna, ha solo l'effetto di provocare un'apparente riduzione di peso di quest'acqua, che per ciò si solleva.

Dall'altra parte della Terra l'acqua è più distante dalla Luna, e la forza di attrazione è minore di quella che occorre per far muovere l'acqua insieme con tutta la Terra. Abbiamo dunque un *difetto* di forza, ossia una forza diretta non più verso la Luna, ma in senso opposto. Anche qui la forza residua riduce il peso dell'acqua e la fa sollevare.

Rimarrebbe da spiegare le basse maree, ma temo di avere già abusato della vostra pazienza, come Catilina... Voglio però aggiungere che non solo Newton è capace di fare questo ragionamento, anche se adopera un linguaggio geometrico piuttosto astruso per le nostre abitudini; ma che applica un ragionamento del tutto simile ai satelliti di Giove, per raggiungere un altro scopo: dimostrare che la forza di gravitazione è proporzionale alla massa del corpo attratto.

Per cominciare, conviene forse pensare non all'acqua sulla superficie della Terra, ma a una situazione diversa e oggi alquanto familiare. Avete mai visto filmati di astronauti che si trovano in una capsula in orbita intorno alla Terra, e giocano con vari oggetti per mostrare agli spettatori gli effetti dell'assenza di gravità? Una delle cose più curiose è la possibilità di far "galleggiare" a mezz'aria una massa d'acqua. Con molta attenzione si riesce a far stare insieme quell'acqua (grazie alla tensione superficiale) che fluttua con movimenti ameboidi, ma senza disgregarsi. Possiamo anche immaginare quale sarebbe la sua configurazione di equilibrio, se si riuscisse a farla galleggiare a lungo e a smorzare tutte le oscillazioni: la risposta che tutti darete è che assumerebbe forma sferica, come una gigantesca goccia.

Ora riflettiamo. In primo luogo, che cosa vuol dire che nella capsula siamo "in assenza di gravità"? È noto da numerose indagini che spesso i ragazzi associano l'assenza di gravità all'assenza di atmosfera, al vuoto. Questo ovviamente non è vero, ma è bene saperlo, ed essere preparati a fare i conti con simili "preconcezioni." Tra l'altro, nella capsula l'aria c'è: infatti gli astronauti respirano senza maschere, e l'acqua rimane allo stato liquido. Allora?

La risposta è che la capsula è in orbita attorno alla Terra, con un moto (supponiamo) circolare che è proprio quello dovuto all'attrazione della Terra. Spesso si descrive questa situazione dicendo che la capsula è "in caduta libera." S'intende che la capsula non sta precipitando verso la Terra; ma si parla ugualmente di caduta perché la forza che ne è responsabile è la gravità, e si dice libera perché non ci sono altre forze (per es. la resistenza dell'aria esterna è del tutto trascurabile).

Ora un moto circolare è *accelerato* e l'accelerazione è quella dovuta alla gravità. Ne segue che se ci si mette all'interno della capsula a fare esperimenti, ci si

trova in un laboratorio *non inerziale*, dove la forza di gravità è apparentemente scomparsa, perché tutto ciò che vi si trova si muove allo stesso modo, e perciò le cose “galleggiano” come se non avessero più peso. Notiamo che questo è vero perché l'*accelerazione*, e non la forza, è la stessa per tutti i corpi: ne segue che la forza ( $F = ma$ ) è esattamente proporzionale alla massa di ciascun corpo, come aveva indovinato Newton.

Ma ai tempi di Newton non c'erano capsule e astronauti: come poteva dunque essere sicuro della verità della sua ipotesi? Ebbe l'idea geniale di far ricorso a un laboratorio esistente in natura, formato da Giove coi suoi satelliti. I quattro satelliti principali di Giove erano stati scoperti da Galileo nel 1610, e perciò ai tempi di Newton, grazie anche allo sviluppo dei telescopi, erano stati ampiamente studiati. Si sapeva che descrivevano traiettorie circolari attorno a Giove, e che i loro periodi obbedivano esattamente alla terza legge di Keplero. Newton era già riuscito a dimostrare che dalla sua legge di gravitazione seguivano tra l'altro le leggi di Keplero per i pianeti intorno al Sole, supponendo che essi fossero attratti soltanto dal Sole; era quindi ovvio che lo stesso si poteva dire per i satelliti di Giove, se si supponeva che essi fossero attratti soltanto dal pianeta. Ma tanto Giove quanto i satelliti sono attratti anche dal Sole: come va che questa attrazione non disturba il moto dei satelliti?

La soluzione sta in quello che abbiamo detto prima. Se ci muoviamo insieme con Giove, siamo in un laboratorio in caduta libera attorno al Sole. In questo laboratorio l'attrazione solare scompare, a condizione che essa sia rigorosamente proporzionale alla massa del corpo attratto. Newton argomenta quindi all'inverso: poiché il moto dei satelliti di Giove ha luogo come se il Sole non ci fosse, deve essere vero che la forza di gravitazione solare su ciascuno dei corpi attratti, Giove e satelliti, è proporzionale alla sua massa.

Torniamo dunque alla gocciolona d'acqua nella capsula spaziale: abbiamo capito che è come se la gravità non ci fosse, e la goccia assumerà quindi una configurazione d'equilibrio sferica, per effetto della sola tensione superficiale. Ma è proprio vero che la gravità si cancella? Così ha detto Newton! Ma bisogna sempre dubitare.

Pensiamo a una parte della goccia, ad es. quella più lontana dalla Terra. Su di essa la forza di gravità è un po' minore, proprio perché è più lontana; quindi cadrà con accelerazione leggermente minore. Mi direte che la differenza è inapprezzabile, ed è vero; però ci serve per preparare il terreno a un caso in cui è un po' meno esigua. Sta di fatto che in linea di principio la parte superiore della goccia dovrebbe “cadere” più lentamente, ossia staccarsi dalla massa principale, spostandosi verso l'alto. Ciò non accade perché lo impedisce la tensione superficiale, ma la differenza di gravità causa comunque una *deformazione* della goccia. Lo stesso accade nella parte inferiore: qui la gravità è maggiore, e quella porzione di goccia viene tirata verso il basso. Conclusione: la goccia non è sferica, ma leggermente allungata in senso verticale.

Ora pensate alla Luna, e immaginatela coperta di acqua: si comporterà come la goccia di cui sopra, solo che essendo molto più grande la differenza di gravità sarà più significativa. Dunque la superficie della Luna verrà deformata da queste differenze di forza (che si chiamano, non a caso, *forze di marea*) e si allungherà nel senso della congiungente con la Terra. Sulla Luna non c'è acqua, ma la forza di marea esiste comunque, e ci torneremo, magari non questa volta.

Passiamo infine alla Terra. Dobbiamo abbandonare il punto di vista antropocentrico, per cui la Terra è il centro, e la Luna le gira attorno: in effetti, come ho detto sopra, ciascuna attira l'altra, ed entrambe sono in orbita attorno al comune centro di massa. Quindi anche per la Terra avremo una forza di marea, dovuta alla Luna, che produrrà la stessa deformazione, consistente in un allungamento in direzione della congiungente con la Luna (e di conseguenza, in uno schiacciamento nel piano perpendicolare). Poiché sulla Terra c'è acqua, questa si solleverà sotto la Luna e dalla parte opposta (alta marea) mentre si abbasserà in tutta la fascia posta a  $90^\circ$  (bassa marea). Poiché la Terra gira su se stessa, rispetto alla crosta terrestre l'alta marea non sta ferma, ma appare girare in senso opposto. Per di più non la troviamo mai proprio sotto la Luna, per via della complicata distribuzione delle terre e delle acque, che non permettono un facile scorrimento; ma su questo è meglio sorvolare.

Approfitto del fatto che siete tutte persone gentili e comunque non mi avete a portata di mano né di voce ... per affrontare un aspetto quantitativo del fenomeno. La forza di marea ha origine gravitazionale; è dunque logico che sia proporzionale alla massa del corpo che causa la marea (ad es. la Luna). Ci si potrebbe anche aspettare, per la stessa ragione, che sia inversamente proporzionale al quadrato della distanza; ma non è così. La ragione è che si tratta di un effetto *differenziale*: non è la forza che conta, ma il modo con cui la forza varia dal centro alla superficie della Terra. Ora si può dimostrare (ma qui evito di entrarci) che la detta differenza è inversamente proporzionale non già al quadrato, ma al *cubo* della distanza.

Che importanza ha questo, direte voi? Dopo tutto la Luna è quella che è, e sta alla sua distanza: non possiamo mica cambiarla! Vero; ma c'è anche il Sole, che produce anche lui la sua brava forza di marea. Il Sole ha una massa che è circa 27 milioni di volte quella della Luna, ma sta a una distanza 390 volte maggiore (in media), che elevato al cubo fa 59 milioni. Risultato: la forza di marea solare è  $27/59$  di quella lunare, ossia poco meno della metà.

Ci sarebbe ora da parlare di altri aspetti delle maree: si vedono solo sull'acqua, oppure hanno effetto anche sulla crosta solida? e sull'atmosfera? Poi non dovremmo dimenticare le maree sulla Luna. Infine: tutti questi moti e deformazioni, che effetto hanno, oltre quelli che si vedono? Intendo sulla Terra, sulla Luna, sui loro moti, magari su altri corpi del sistema solare o fuori di esso. Poi dovrei spiegare che c'entra Einstein con le maree. Ci sarebbe ... dovrei ... ma l'ho fatta fin troppo lunga, e perciò rimando il seguito a una futura occasione.

Intanto chi ha del vino da imbottigliare faccia attenzione: come dice Bernardo Davanzati (*Toscana coltivazione delle viti e delli arbori*) “In quei dua termini del fare e del voltare della luna, guardati di non imbottare né tramutar mai vino.” Io ci credo poco, ma non ho vigneti né cantine, per cui non rischio nulla.