

La candela

Se c'è qualcuno che mi segue regolarmente in queste mie chiacchierate, sa che ogni tanto lascio in sospeso un argomento, che poi riprendo a distanza di tempo. È ciò che avevo intenzione di fare oggi: ricordavo di non aver finito il discorso sulle maree, e sono andato a cercare le prime puntate... La sorpresa è stata di vedere quanto tempo è passato: ne avevo parlato nell'aprile '95 e nel febbraio '96; davvero troppo perché possa sperare che ricordiate che cosa avevo scritto! D'altra parte quello che ho da dire si collega col vecchio discorso, e perciò non posso far altro che dare un brevissimo riassunto delle cose essenziali, rimandando chi ci tiene alle puntate di allora...

Ma cominciamo con la conclusione della puntata del '96, dove enunciavo il programma... futuro:

“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.”

Dubito che riuscirò a parlare oggi di tutto questo... Ma veniamo al riassuntino.

Avevamo visto che la causa delle maree è l'attrazione gravitazionale di altri corpi celesti (Sole e Luna, nel caso della Terra) e che più esattamente la marea è un effetto *differenziale*: è la parte di attrazione che non è cancellata dal moto di “caduta” del corpo attratto. Nei punti della Terra più vicini alla Luna (o al Sole) l'attrazione è più intensa, e quindi la parte non compensata è diretta verso la Luna (verso il Sole); nei punti opposti è invece più debole, e la forza risultante è diretta nell'altro verso. Questo spiega perché ci sono due alte maree al giorno (circa) e non soltanto una.

Avevo anche detto che la forza di marea è (ovviamente) proporzionale alla massa del corpo che la causa, e anche (assai meno ovviamente) inversamente proporzionale al cubo della distanza. Non avevo invece fornito un ultimo dato: la forza è anche proporzionale alle dimensioni del corpo su cui agisce. Questo dipende proprio dall'essere un effetto di non-compensazione: se ci poniamo nel centro della Terra, la forza di marea è nulla, e diventa tanto più grande quanto più ci si allontana dal centro. Vedremo poi a che servono queste considerazioni semi-quantitative.

* * *

Passiamo ora al primo argomento lasciato in sospeso: esistono maree della crosta e dell'atmosfera? La risposta è sì in linea di principio, ed è anche sì

in termini di osservazioni; ma queste sono di gran lunga più difficili che per le maree oceaniche. Tanto è vero, che non mi è stato facile trovare dati attendibili, e quelli che darò tra poco vanno perciò presi . . . con beneficio d'inventario.

Per la crosta terrestre, la causa della difficoltà è che se questa si alza e si abbassa, prevedibilmente di decimetri, non c'è modo di accorgersene perché ci manca un riferimento immobile. Ci si può aspettare che la marea crostale sia più piccola di quella oceanica — anche se non di molto — perché la roccia oppone una resistenza alla deformazione che l'acqua non presenta.

Quello che si è fatto da tempo è stato di rilevare un effetto indiretto, ossia una variazione dell'accelerazione di gravità; in epoca più recente credo che si riescano ad avere dati più diretti, grazie ai sistemi satellitari (GPS). (Tra parentesi, una volta o l'altra mi piacerebbe raccontare come funzionano questi sistemi, che oggi sono diventati di uso comune, ma racchiudono diversi aspetti di serio interesse scientifico.) Come dicevo sopra, non ho dei dati definiti sull'ampiezza delle maree crostali.

Quanto alla marea atmosferica, non dovremmo aspettarci che sia piccola, ma è anch'essa difficile da vedere, perché l'atmosfera non ha una superficie netta, come l'oceano. Quello che possiamo aspettarci è che un accumulo di aria nella zona di alta marea comporti un aumento della pressione al suolo, e viceversa con la bassa marea. L'azione della Luna dovrebbe quindi produrre variazioni cicliche di pressione, due volte al giorno (più esattamente, il periodo è quasi 12 ore e mezza: metà dell'intervallo tra due successive culminazioni della Luna). Poi ci sarà una marea solare, con periodo di 12 ore e di ampiezza circa metà dell'altra.

Diciamo subito che la marea solare è difficilissima da rivelare, perché è mascherata da un effetto molto più grande e con periodo di 24 ore, la cui causa sta nelle escursioni termiche tra dì e notte. Quanto alla marea lunare, ho letto che è stata misurata un'escursione di pressione di 9 Pa, ossia meno di un decimillesimo della pressione atmosferica media.

Per farci un'idea di che cosa può significare una variazione di pressione di questo genere, consideriamo che se l'atmosfera avesse a ogni quota la stessa densità che al suolo, per produrre la pressione media occorrerebbe uno strato spesso 8 km circa. Un decimillesimo di questo fa 80 cm: quindi se l'aria fosse un oceano come quello liquido, la sua superficie si alzerebbe e abbasserebbe un po' meno di un metro. Il che torna benissimo, perché è circa quanto ci si aspetterebbe da una marea oceanica lunare, in assenza delle complicate perturbazioni di cui parlai anni fa.

* * *

Veniamo ora a un altro aspetto delle maree, non visibile (o quasi) su scala umana, ma importante per l'evoluzione del sistema solare. Come influiscono le maree sul moto della Terra (e della Luna)? Intuitivamente, il ragionamento è

questo: i continui spostamenti della massa oceanica e le continue deformazioni della crosta terrestre non avvengono senza attriti, quindi dissipano energia. Da dove viene questa energia? dove va? Che effetto ha questa dissipazione? È un effetto osservabile?

A prima vista almeno una risposta sembra ovvia: l'energia dissipata proviene dal moto di rotazione della Terra, che dovrà quindi essere rallentato. La risposta è giusta in senso qualitativo, o meglio è una parte della risposta: vedremo poi perché. La complicazione del moto reale delle maree oceaniche rende problematico essere più precisi. Le correnti di marea debbono spostare acqua da un mare a un altro, da un oceano a un altro, passando a volte per stretti di modesta apertura e basso fondale (tipico, lo stretto di Bering). È in questi passaggi che si ha la maggiore dissipazione, ma dubito che ancor oggi se ne sappia dare una stima attendibile.

Possiamo allora guardare la cosa dall'altro lato: è vero che la rotazione della Terra rallenta? è un effetto osservabile? Qui la risposta è un po' più sicura. Indicazioni attendibili esistono da almeno mezzo secolo; sarebbe interessante discutere come siano state ottenute, perché ci porterebbe nei meandri della misura del tempo; ma andremmo troppo lontano, e almeno per questa volta preferisco lasciare da parte l'argomento. Mi limito a citare il risultato: un rallentamento della rotazione terrestre esiste ed è misurato con ragionevole precisione, anche se ha un andamento alquanto irregolare (il che fa pensare che la causa sia più complessa che non le sole maree). In termini quantitativi, la Terra nell'ultimo secolo ha ritardato all'incirca di 65 secondi; ma per evitare equivoci questo punto va spiegato un po' meglio.

Non sto affatto dicendo che il periodo di rotazione (il giorno) si è allungato di 65 secondi, che sarebbe un rallentamento spropositato; ma che un orologio regolato sulla rotazione terrestre (tempo siderale) si troverebbe oggi indietro di 65 secondi su un orologio ideale col quale andava d'accordo, anche come marcia, all'inizio del 20-mo secolo. Il punto delicato è che occorre tener distinti due tipi di errori di un orologio, che distinguerò con due verbi: *andare* indietro o *essere* indietro.

Dico che un orologio è indietro di un minuto se segna le 10 e 35 quando l'altro segna le 10 e 36; dico invece che *va* indietro se il suo ritardo progressivamente aumenta, per es. di un minuto al giorno. Nel caso della Terra e dell'orologio ideale, ho supposto che andassero d'accordo nel 1900, sia nel senso di segnare la stessa ora, sia di marciare allo stesso modo. Quindi la Terra nel 1900 non era indietro né andava indietro. Oggi è indietro di oltre un minuto, perché progressivamente *va* indietro sempre di più.

Ne segue che anche la durata del giorno si dev'essere allungata, e supponendo che il rallentamento sia stato costante, è facile calcolare di quanto: il risultato è che nell'ultimo secolo il giorno si è allungato di quasi 0.004 s. Da qui possiamo anche ricavare quanta energia è stata dissipata: all'incirca un decimilionesimo

dell'energia cinetica di rotazione della Terra. Un decimilionesimo in un secolo sembra molto poco, ma se estrapoliamo a un milione di anni diventa $1/1000$, e non è più tanto poco; e in un miliardo di anni? Ma è chiaro che a questo punto l'estrapolazione è assai azzardata, perché non possiamo aspettarci che in un miliardo di anni tutto sia rimasto uguale, e che il tasso di dissipazione sia rimasto inalterato. Tuttavia è interessante scoprire che su una scala di tempi geologica si tratta certamente di un effetto importante.

Se invece di guardare al passato guardiamo al futuro, potremmo a prima vista concludere che tra un miliardo di anni tutta l'energia cinetica della Terra sarà stata consumata; ma per la ragione già detta, tale conclusione sarebbe assai poco giustificata. Possiamo però sviluppare un po' di più il ragionamento: se la rotazione terrestre rallenta, anche la dissipazione di energia dovuta alle maree si riduce di entità, per cui il rallentamento della rotazione . . . rallenta esso stesso (scusate il bisticcio . . .). È facile capire che si arriverà a un equilibrio quando il periodo di rotazione della Terra sarà uguale al periodo di rivoluzione della Luna: infatti a quel punto l'onda di marea sarà fissa rispetto alla superficie terrestre, e non ci sarà più dissipazione. Quanto ci vorrà? Confesso di non saperlo, e non so nemmeno se esistano calcoli affidabili. Da quello che abbiamo appena visto, sembra si possa concludere che ci vorranno miliardi di anni.

Incidentalmente, lo stesso fenomeno si è prodotto per la Luna, che già oggi “volge sempre la stessa faccia alla Terra,” il che sta appunto a significare che il suo periodo di rotazione è uguale al periodo orbitale. È un facile errore dire che la Luna non ruota su se stessa, visto che vediamo sempre la stessa faccia; ma chi dice questo dimentica che la Luna ci gira attorno, per cui se davvero non ruotasse (rispetto alle “stelle fisse”) in un mese circa ne potremmo vedere tutta la superficie.

Come mai per la Luna l'equilibrio si è già prodotto, e per la Terra no? La ragione è molteplice. C'è il fatto che la forza di marea sulla Luna è maggiore: dato che va come la massa del corpo agente, è 80 volte maggiore (rapporto delle masse di Terra e Luna). Però la Luna è 4 volte più piccola, e questo riduce la forza a $1/4$, come ho ricordato sopra. Resta comunque ancora 20 volte maggiore. Poi è da considerare che a parità di velocità angolare l'energia cinetica della Luna è minore, causa la minore massa e le minori dimensioni: mille volte più piccola. C'è quindi molta meno energia da dissipare. È vero che sulla Luna non ci sono oceani, e la dissipazione può essere dovuta solo alle maree crostali; ma non è certo strano se il tempo per l'equilibrio si riduce da miliardi di anni forse a milioni (vado a naso, perché non conosco neppure questi dati). C'è dunque stato tempo in abbondanza, qualunque sia stata l'origine della Luna, che non è certo recente, perché l'equilibrio sia stato raggiunto.

* * *

Se ora pensate che con Terra e Luna abbiamo finito, vi sbagliate. Il rallentamento della Terra deve implicare un altro effetto: l'allontanamento della Luna. Vediamo perché.

In sostanza entra qui in ballo un principio fondamentale della dinamica newtoniana: il terzo principio, detto anche “di azione e reazione.” Se la Luna agisce sulla Terra in modo da rallentarne la rotazione, la Terra deve reagire sulla Luna... Sì, ma come? Qui mi dispiace per quelli fra i pochissimi lettori che hanno resistito fin qui, se non amano le astrazioni della fisica, ma è proprio a una di quelle astrazioni che conviene ricorrere per spiegare nel modo più semplice ciò che succede.

Dato che stiamo parlando di rotazioni, il terzo principio si applica nella forma di *conservazione del momento angolare*, altrimenti detto anche “momento della quantità di moto.” Il sistema Terra–Luna può essere considerato isolato a questi effetti, quindi il suo momento angolare totale deve restare costante. Dato che la rotazione della Terra rallenta, il suo momento angolare diminuisce, quindi quello della Luna deve aumentare di altrettanto. Allora la Luna girerà più velocemente attorno alla Terra? il suo periodo orbitale diminuirà? Mai più! Per paradossale che possa sembrare, accadrà proprio l'opposto.

Sappiamo che il moto della Luna si svolge su un'orbita pressoché circolare (non proprio, ma evitiamo complicazioni inessenziali). In queste condizioni, per aumentare il momento angolare c'è una sola possibilità: *aumentare il raggio dell'orbita*. È vero che così facendo il periodo aumenterà (terza legge di Keplero) e diminuiranno tanto la velocità angolare quanto quella lineare; ma l'aumento del raggio conta di più, e si può dimostrare (vi faccio grazia dei calcoli) che il momento angolare cresce proporzionalmente alla radice quadrata del raggio.

Riassumendo: dato che il momento angolare della Terra diminuisce, la Luna deve allargare la sua orbita, col che aumenta il periodo, diminuisce la velocità, ma aumenta il momento angolare. Bene: visto che sappiamo di quanto rallenta la Terra, possiamo anche calcolare di quanto deve crescere la distanza Terra–Luna: il risultato sarebbe un po' meno di 7 cm all'anno. Ma questa distanza si può misurare; da quando è stato depositato, nel 1969, un retroflettore sulla Luna, le misure si fanno con grandissima precisione. E ne risulta un allontanamento di 3.8 cm all'anno; poco più di metà del valore calcolato. Dovremmo ritenere che non c'è accordo fra teoria e osservazioni?

La risposta è no, per più ragioni; la principale è che nel calcolo abbiamo ricavato la variazione di distanza dall'intero effetto di rallentamento della rotazione terrestre. Ma sappiamo che le maree (e quindi anche il rallentamento che ne consegue) non sono dovute soltanto alla Luna: c'entra anche il Sole, per un ammontare quasi metà di quello dovuto alla Luna. Invece solo le maree lunari possono influire sulla Luna; quindi avrei dovuto basare il calcolo non sull'intero rallentamento misurato, ma solo su circa 2/3 di questo. Correggendo a questo

modo, si prevede una variazione di 4.3 cm all'anno, che è molto più vicina al valore osservato.

E la marea solare che effetto ha? Non entro in dettagli, perché ho altre cose da dire; mi limito perciò ad affermare, senza giustificazione, che produrrà un'analogica variazione della distanza Terra-Sole, ma in misura del tutto inapprezzabile con le tecniche odierne.

* * *

Lasciamo ora Terra e Luna, per chiederci: ci sono altri effetti di marea nel sistema solare? La risposta è ovviamente sì, e qui potrò ricordarne soltanto uno, credo famoso: i vulcani di Io.

La storia comincia nel 1979, quando le due sonde Voyager raggiungono Giove e ci mandano le prime foto dei suoi satelliti maggiori, prese da vicino. La più grande sorpresa è che su Io, il satellite più vicino a Giove, si vedono non solo evidenti formazioni vulcaniche, ma addirittura vulcani in eruzione, con tanto di pennacchi di fumo... Lascio da parte l'aspetto planetochimico, ossia il fatto che il materiale eruttato appare essere principalmente zolfo e SO₂ solida; per il nostro tema è invece rilevante la domanda che subito si pone: che cosa mantiene attiva la crosta del satellite? qual è la sorgente di energia?

Ricordiamo alcuni dati su Giove e satelliti: la massa di Giove è oltre 300 volte quella della Terra; Io ed Europa sono piuttosto vicini alla Luna sia come raggio orbitale sia come dimensioni e masse. Ne segue subito che le forze di marea prodotte da Giove su quei satelliti sono molto più grandi di quelle della Terra sulla Luna, e perciò i satelliti debbono aver raggiunto da tempo l'equilibrio di cui abbiamo parlato: entrambi mostrano a Giove sempre la stessa faccia (lo stesso vale anche per gli altri, di cui però qui non voglio occuparmi). Dunque essi subiranno forti deformazioni, che saranno però statiche rispetto alla crosta, e quindi non potranno essere causa di dissipazione di energia. Sembra dunque che venga a mancare una facile spiegazione...

Aggiungiamo però altri dati: il periodo orbitale di Io è di circa 42 ore e mezza, quello di Europa di circa 85. Il secondo è quasi esattamente il doppio del primo; una situazione che in meccanica celeste è nota come "risonanza." Ne segue che ogni 85 ore Io sorpassa Europa; e ogni volta che questo accade, la forza di attrazione fra i due è particolarmente intensa. Dato il sincronismo dei loro moti, la perturbazione reciproca viene esaltata. Non posso entrare in maggiori dettagli, e debbo limitarmi a citare l'effetto principale: a causa di questa perturbazione l'orbita di Io viene mantenuta leggermente eccentrica, mentre se la perturbazione non ci fosse tenderebbe a divenire circolare (purtroppo, se non altro per brevità, non posso spiegare neppure questo ...).

Ma che importanza ha che l'orbita di Io sia eccentrica? Dopo tutto, non abbiamo trascurato l'eccentricità della Luna? Sì, ho dovuto farlo, con dispiacere, altrimenti questa puntata non sarebbe finita mai ...; ma l'eccentricità di Io è importante, a causa dell'entità delle forze di marea, e per colpa della seconda

legge di Keplero. Come ben sapete, questa ci dice che in un'orbita eccentrica la velocità angolare non è costante: è costante la velocità areale, il che implica che la prima sia invece inversamente proporzionale al quadrato della distanza dal pianeta. Ma qui abbiamo un satellite che ruota su se stesso con lo stesso periodo del moto orbitale (un giro in 42 ore e mezza) e la rotazione su se stesso è uniforme. Quindi non può restare in passo col moto orbitale, e non è esattamente vero che Io mostri sempre la stessa faccia a Giove: ci sono piccole oscillazioni attorno a una posizione media. Lo stesso accade anche per la Luna: il fenomeno si chiama “librazione.”

La librazione abbiamo potuto trascurarla per la Luna, ma non perché sia piccola: era già nota a Galileo. È il conseguente effetto di marea che ha poca importanza, mentre ne ha molta per Io: il suo corpo viene continuamente distorto dalla marea, e gli attriti interni trasformano l'energia elastica della deformazione in energia interna (*vulgo*, “calore”). Succede la stessa cosa alle gomme della nostra macchina, quando le troviamo calde dopo un po' di km in autostrada (e tutti sanno che si scaldano di più se non sono ben gonfie ...). Ecco da dove viene l'energia che si manifesta come vulcanismo.

Ora mi aspetto una domanda: e perché non ci sono vulcani anche su Europa? In parte per la maggior distanza da Giove, che riduce a 1/4 la grandezza delle maree; ma c'è un'altra ragione: alla superficie di Europa (e sembra per qualche decina di km all'interno) c'è acqua, che non c'è invece su Io. Ovvvia domanda: e perché questo? Risposta (per quel poco che ne so): perché Io, essendo più vicino, è stato riscaldato molto di più, specialmente quando Giove era più caldo di oggi e aveva una forte emissione infrarossa. Ma anche le stesse deformazioni mareali tengono Io a una temperatura alla quale l'acqua non può esistere, neppure come vapore. Perciò l'acqua da Io è sfuggita, da Europa no. Esiste anzi la congettura che sotto lo strato visibile di ghiaccio ci sia dell'acqua liquida, con possibili implicazioni esobiologiche...

E per questa volta debbo fermarmi, anche se l'argomento maree è tutt'altro che esaurito. Speriamo che non mi ci vogliano altri cinque anni per riprenderlo...