L’ultimo argomento è la rotazione della terra

Allora le leggi che governano la rotazione di un oggetto sono in qualche misura parallele a quelle che regolano il moto di traslazione; qui ho non ho resistito alla tentazione di introdurre dei termini tecnici non so se questo renderà le cose più facili o più difficile, proviamo!

La rotazione di un oggetto dotato di massa è descritta da una quantità che si chiama momento angolare che in qualche modo può essere considerata la quantità di rotazione dell’oggetto che è dato dalla velocità angolare di rotazione moltiplicato una quantità che si chiama momento di inerzia che è essenzialmente il prodotto delle massa, vedetela così, in modo molto approssimativo, per la distanza media della massa stessa dall’asse di rotazione; cioè uno stesso oggetto, o meglio, oggetti di forma simile ma che hanno stessa massa possono avere momenti di inerzia diversi a seconda per esempio nel caso di un disco, più il raggio è grande più il momento di inerzia cresce a parità di massa; perché questo è importante? Perché il momento angolare di un oggetto è sottoposto a una legge che in un certo senso è l’analogo della legge di inerzia cioè il momento angolare di un oggetto isolato non sottoposto a nessuna forza rimane costante e quindi se ho un oggetto che cambia momento d’inerzia per esempio una sbarra con due sfere applicate e la distanza delle sfere aumenta nel tempo per conservare il momento di inerzia la velocità di rotazione deve diminuire; l’esempio che si fa spesso è quello della ballerina che comincia a ruotare con le braccia estese e se porta le braccia verso il corpo ovviamente la sua massa non cambia però il momento d’inerzia sì perché una parte considerevole del corpo da molto distante dall’asse di rotazione viene avvicinata e questa variazione del momento di inerzia a parità di altri fattori, in particolare senza che la ballerina debba spingersi per ruotare, provoca un aumento della velocità di rotazione; vedremo poi la prossima lezione che questo è molto importante per l’evoluzione dei primi stadi del sistema solare.

Cosa succede quando invece un corpo è sottoposto a delle forze?

Dicevamo che il momento angolare di un corpo isolato rimane costante quindi un corpo che ruota, potrebbe essere la terra, se non è sottoposto a forze esterne continua a ruotare alla stessa velocità angolare a meno che non ci sia all’interno del corpo una ridistribuzione di massa naturalmente, mentre invece se al corpo vengono applicate delle forze il suo stato di rotazione può cambiare; questo è l’equivalente del fatto che una forza che agisce su un corpo che produce un’accelerazione, nel caso della rotazione è necessario applicare una forza che produca una coppia cioè non basta una forza ma deve esser una forza applicata in un punto distinto dall’asse di rotazione che abbia una componente di versa da zero nel senso della rotazione.

Se io ho un oggetto che ruota semplicemente lo spingo lungo il suo asse il suo stato di rotazione non cambia per far cambiare il suo stato di rotazione devo applicare una forza in un posto diverso dall’asse e in una direzione non esattamente diretta verso l’asse stesso; deve essere una componente ortogonale all’asse.

Mi accorgo purtroppo che sto dicendo cose molto imprecise però non ho trovato il modo di dirlo altrimenti senza ricorrere alla matematica.

Facciamo un esempio concreto che poi è molto utile perché ha un parallelo nel moto della terra; voi sapere che una trottola quindi un rotatore in condizioni normali, posto su un tavolo ha questo movimento di precessione quindi vi dicevo che un oggetto che ruota non sottoposto a nessuna forza mantiene la sua velocità angolare quindi il suo stato di rotazione, il suo asse rimane, la velocità angolare rimane costante e il suo asse rimane nella stesa direzione in cui puntava inizialmente quindi chiaramente questo moto di precessione indica che il rotatore è sottoposto a una forza e trattandosi di una trottola l’unica forza che agisce è quella di gravità; come mai la gravità provoca un moto di questo genere? si può forse capire, questo deriva dalle equazioni , però si può forse capire con un’analogia rispetto alle equazioni fondamentali del moto: forza = ma trovata da galileo; quello che succede è che il rotatore si trova in un campo di gravità che tende a farlo cadere verso il basso, verso il centro della terra, se il suo asse di rotazione è inclinato rispetto alla verticale questo provoca una coppia di forze che tenderebbe a far ruotare il rotatore in senso ortogonale al suo asse;

mi spiego: supponiamo che questa sia la trottola e la trottola ha una asse di rotazione inclinato rispetto alla verticale, la gravità tenderebbe a far ruotare al trottola in questo modo; se la trottola non girasse e io la metto sul suo asse in direzione obliqua rispetto ala verticale, questa cadrebbe per terra invece siccome sta ruotando succede questa cosa: la gravità tenderebbe a farla ruotare in questo modo e quindi tenderebbe a creare un velocità di rotazione con un asse diretto in questo senso. Il suo asse di rotazione introno a cui sta ruotando è diretto in questo senso; quello che succede è che l’asse di rotazione viene spostato diciamo in modo che l’asse risultante è la combinazione del piano dell’asse di rotazione attuale e di quello indotto dalla coppia delle forze e quindi l’asse si sposta in questo modo; è molto controintuitivo però è quello che succede nella trottala: questo è uno dei quei casi che il mio professore all’università classificava come una delle perversità del campo gravitazionale. Il campo gravitazionale attrae la trottola verso il basso e la trottola cosa fa ? invece di cadere comincia a girare intorno alla verticale.

Quindi questo è un esempio di un fatto di tutti giorni si può dire la cui spiegazione è abbastanza complicata ma ve ne ho parlato perché se voi accettate questo fatto piuttosto strano non avete difficoltà a capire il movimento di rotazione della terra perché anche la terra è un rotatore ; un rotatore fatto in un modo particolare: non è veramente una sfera ma è un ellissoide di rotazione cioè una sfera schiacciata ai poli; il raggio terreste in direzione dell’equatore è un po’ più lungo del raggio polare e però per quanto riguarda questo effetto è circa un trecentismo quindi su questo mappamondo non lo vedreste anche se ci fosse; io credo che questa sia una sfera perfetta ma un trecentismo a occhio non si vede; ma la differenza tra la terra e la sfera è solo uno schiacciamento polare allora questo dovrebbe farvi capire che qualsiasi forza esterna non può cambiare la velocità di rotazione della terra in particolare qualsiasi forza di attrazione gravitazionale che sono le forze più comuni nel sistema solare; se io ho un oggetto esterno supponiamo il sole in questa direzione o la luna e vedo che attira separatemene in vari elementi in cui la terra è costituita ma siccome la terra da questo punto, rispetto a un piano che passa per il corpo cha attrae e i poli ha simmetria perfetta bilaterale, questa attrazione non può produrre nulla perché per ogni elemento di terra che viene attratto verso il sole ne ho una corrispondente dalla parte opposta che viene attratto e quindi la risultante delle forze che possono esercitare una coppia sulla rotazione è esattamente zero.

Questo non avverrebbe se la terra avesse delle dune, se fosse una patata le cose andrebbero diversamente ma la terra ha questa simmetria di un ellissoide di rotazione e quindi questa è la spiegazione del motivo per cui la rotazione della terra ha una velocità angolare estremamente costante tanto che fin dagli albori ma ancora prima dell’astronomia la rotazione terrestre venne usata come orologio per misurare le ore; non è la stessa cosa però in senso ortogonale perché la terra è schiacciata quindi lo stesso oggetto che non produce nessuna coppia in senso nessuna variazione della velocità angolare produce però una coppia in questo senso perché il rigonfiamento equatoriale fa sì che se l’oggetto non è sul piano dell’equatore della terra come in questo caso… forse questo lo spiego meglio se…

supponiamo che ci sia un oggetto cha attira la terra su un piano diverso da quello dell’ equatore come in effetti è per il sole per la luna , vi dicevo prima, il piano su cui avviene l’orbita del sole intorno alla terra , della terra intorno al sole è distinto dal piano equatoriale; allora siccome la distanza tra questo punto e questo punto e il sole o la luna non è uguale, c’è un’attrazione maggiore di questa parte del rigonfiamento equatoriale rispetto a questa e questo provoca una coppia che è esattamente uguale a quella della trottola , nel caso della trottola era verso il basso qui è di lato ma è comunque una trottola che tende a ruotare la terra su un asse ortogonale a quello della sua rotazione e quello che succede è esattamente la stessa cosa che succede al rotatore cioè la terra precede; questa è la spiegazione della precessione lunisolare perché ovviamente i corpi che agiscono gravitazionalmente in modo più intenso sulla terra sono la luna e il sole; la lune perché è più vicina e il sole perché è molto più lontano ma ha una massa molto maggiore; gli altri pianeti sono molto più piccoli del sole e hanno una distanza che è paragonabile a quella del sole quindi contano molto meno: c’è anche una precessione planetaria però è molto piccola; questo è il motivo per cui l’asse di rotazione della terra che adesso punta vicino alla stella polare nel corso dei millenni si sposta secondo un ciclo che è molto lento dura 26000 anni e percorre un cono che è pari di ampiezza pari all’inclinazione dell’asse di rotazione rispetto al piano in cui avviene l’orbita del sole e della luna quindi 23,5 ° . Un altro fenomeno legato alla rotazione sono le maree; le maree di per s, all’ordine zero non c’entrano con la rotazione sono dovute semplicemente al fatto che un corpo vicino alla terra come la luna attrae maggiormente le regioni della terra, della massa terrestre che si trovano dalla stessa parte perché si trovano più vicine rispetto a quelle del lato opposto; è la legge dell’inversamente proporzionale al quadrato della distanza; quello che succede è che l’attrazione della terra verso la luna in un punto interno alla terra abbastanza vicino al centro è compensata dalla forza centrifuga dovuto al moto orbitale della terra intorno alla luna o meglio al baricentro del sistema terra-luna; e quindi se io aggiungo questa forza centrifuga il risultato è che la forza rimanente che è quella che poi produce la marea punta in direzione della luna nelle zone della terra più vicine alla luna e in direzione opposta nelle zone dell’altro emisfero questo perché la forza centrifuga più o meno è sempre la stessa e invece la forza di gravità di attrazione verso la luna cambia a seconda della distanza allora questa forza residua, forza mareale è sempre una differenza di due forze: la forza centrifuga e la forza di attrazione provoca il fatto che i mari seguono una superficie che è equipotenziale rispetto a questa forza e quindi c’è questo doppio rigonfiamento sia in direzione del corpo che attira la massa d’acqua sia però anche nell’emisfero esattamente opposto ; dico mari ma potrei dire anche terra solida perché la terra solida ha una certa elasticità e quindi come esiste una marea oceanica esiste anche una marea terrestre che è un innalzamento, abbassamento della superficie terreste rispetto al centro della terra di circa 30 cm dovuto esattamente a questo effetto, tranne che nel caso della superficie terrestre noi non ce ne rendiamo conto perché è un movimento molto dolce che avviene in un periodo di ore; tutta la superficie si muove nello stesso modo e quindi non ce ne accorgiamo; del mare ci accorgiamo perché questo provoca delle correnti e quindi delle ridistribuzioni di masse d’acqua.

Vi dicevo prima che la rotazione terrestre è con grande approssimazione uniforme dagli inizi del 1900 si è visto che questo non è vero fino in fondo: ci son piccolissime variazioni nella velocità di rotazione della terra; variazioni sia di direzione per esempio questa è un grafico della posizione del polo di rotazione di rotazione terrestre intorno a un punto vicino al polo nord; veramente qui polo nord diventa un termine un po’ ambiguo. Se segnassimo un punto di riferimento sulla crosta terrestre vedremo che il polo definito come intersezione dell’asse di rotazione della crosta terrestre cambia di posizione nel tempo queste sono coordinate date in metri quindi sono pochi metri sulla superficie terrestre che seguono un percorso che è quasi periodico però con ampiezza che vari un po’ nel tempo e che è dovuto a vari fenomeni essenzialmente è una ridistribuzione di masse all’interno della terra. Nello stesso modo anche la velocità di rotazione della terra non è costante, la lunghezza del giorno non è esattamente costante ma cambia un po’ nel corso del tempo questo è un grafico delle variazioni della lunghezza del giorno anno per anno questo su un periodo di circa 35 anni e questo è il residuo della durata del giorno rispetto alle 24 ore standard e vedete che ci sono delle variazioni dell’ordine di pochi millisecondi e queste variazioni vi dicevo non sono dovute a influenze gravitazionali esterne perché queste non possono produrre come vi ho spiegato prima variazioni di velocità angolare ma sono prodotte da due fenomeni: uno è, queste sono le variazioni a breve periodo cioè periodi di un anno , 6 mesi , a una ridistribuzione delle circolazioni di venti e di correnti oceaniche nella terra ; per esempio nell’alta atmosfera esistono delle correnti di venti che hanno direzioni costante e hanno velocità variabile a seconda dell’anno e siccome il momento angolare della terra totale (superficie più atmosfera) rimane costante se cambia la velocità di rotazione delle correnti di venti deve cambiar in senso opposto la velocità di rotazione della parte solida della terra.

In più c’è un effetto secolare voi vedete che le variazioni periodiche c’è un trend e questo è dovuto al, purtroppo non ho tempo di entrare nel dettaglio in questo, ma a un frenamento della velocità della rotazione terrestre dovuto all’attrito delle maree; la luna ma anche il sole producono un rigonfiamento negli oceani la terra che è sempre diretto nella direzione della luna e quindi ruota ad una velocità molto inferiore a quello della terra, la terra ruota sotto questo rigonfiamento e siccome il fondo degli oceani non è perfettamente liscio c’è un attrito introdotto da questa rotazione che provoca due effetti complementari 1 – un allungamento progressivo della durata del giorno cioè la rotazione terrestre viene frenata, in piccolo è lo stesso effetto ha prodotto il fatto che la luna rivolge sempre la stessa faccia al sole; la terra ha una massa molto più grande, questo effetto di frenamento mareale sulla luna prodotta dalla terra era molto più grande quindi ormai la luna è arrivata ad essere completamente frenata nella sua rotazione e rivolge sempre la stessa faccia alla terra; l’altro effetto è un aumento della distanza terra luna perché il momento angolare che viene sottratto dal movimento di rotazione della terra finisce nel momento angolare dell’orbita lunare e provoca un allontanamento progressivo della luna che probabilmente in passato ha portato la luna ad avere la sua orbita attuale dopo che, probabilmente , questa è la teoria più accreditata, si è separata dalla terra, e in un lontano futuro potrebbe portare la luna a non essere più un satellite della terra, uscire dall’orbita terrestre e diventare un pianeta all’interno del sistema solare non più un sistema terra- luna.

D. A proposito del fatto che la luna rivolge sempre la stesa faccia, ha parlato dell’effetto di attrito… e sulla Luna?

R. Sulla luna ha una marea solida, cioè una deformazione della parte solida della luna che comunque c’è anche nella terra siccome il materiale di cui è formata la luna non è perfettamente elastico ma ha una componente vistosa; quindi c’è un attrito anche in questa deformazione.