



- 1. La coerenza interna dei principi della dinamica**
- 2. La visione moderna delle forze**
- 3. Simmetria e conservazione**

Egidio Longo

**Dipartimento di Fisica
Università "La Sapienza" di Roma**



la sintesi newtoniana

- **primo principio:** in assenza di forze, un corpo mantiene il proprio stato di moto rettilineo uniforme
- **secondo principio:** in presenza di forze, il corpo muta il proprio stato di moto, con accelerazione proporzionale alla risultante delle forze esterne

Lo stato "naturale" di un corpo non è la quiete, ma il moto rettilineo uniforme.



forza e accelerazione

ci si può domandare se lo stretto legame tra forza ed accelerazione, che a volte è persino considerato una definizione ($f = ma$ definizione "dinamica" delle forze) non nasconda una ambiguità, una circolarità.

- per esempio: come facciamo a sapere se su un corpo non agiscono forze?
- siamo in grado di fare esperimenti su un "corpo isolato" per verificare che non è soggetto ad accelerazioni?



il corpo "isolato" in linea di principio

Oggi sappiamo che le forze fondamentali della natura **diminuiscono tutte al crescere della distanza.**

Quindi, almeno in linea di principio, possiamo rendere un corpo isolato allontanandolo dagli altri corpi.

Man mano che lo allontaniamo, le forze diminuiscono, e possiamo verificare che diminuiscono in ugual misura le accelerazioni che ne risultano.

Possiamo quindi "estrapolare" almeno idealmente la condizione di un corpo fino a considerarlo **isolato**



il corpo "isolato" in pratica

in pratica si possono annullare eventuali forze agenti su un corpo applicando forze uguali e contrarie

p.es. appoggiando un corpo su un tavolo, si cancella la forza peso sommando la reazione del tavolo, uguale e contraria. La risultante delle forze è nulla.

Questa cancellazione si può fare in maniera controllata e misurabile, per esempio sospendendo il corpo ad un "dinamometro" (una molla che esercita una forza proporzionale alla sua lunghezza, secondo una costante di proporzionalità ben conosciuta)





principio di relatività galileiana

- le leggi della fisica sono identiche in tutti i sistemi di riferimento che si muovono di **moto rettilineo uniforme** uno rispetto all'altro
- non è possibile distinguere uno di questi riferimenti da un altro sulla base di nessun **esperimento fisico**



sistemi inerziali

- esistono dei riferimenti in cui i punti non soggetti a forze, se fermi, rimangono fermi: chiamiamoli **sistemi inerziali**
- la nostra massa appesa al dinamometro, se è ferma, rimane ferma. D'altra parte non è soggetta a forze (**la risultante delle forze è nulla**). Possiamo dire che ci troviamo in un riferimento inerziale
- se applichiamo una forza ulteriore, la massa si mette in movimento, acquista una accelerazione.



sistemi inerziali + relatività galileiana = principio di inerzia

- se un sistema di riferimento gode della proprietà di essere inerziale, tutti i riferimenti che si muovono di moto rettilineo uniforme rispetto ad esso godono della stessa proprietà
(altrimenti sarebbero distinguibili tra di loro, violando il principio di relatività)
- Ma ora, tutti i punti fermi in un sistema inerziale, sono visti muoversi di moto rettilineo uniforme negli altri riferimenti inerziali: è il primo principio della dinamica, o principio di inerzia.



piccola digressione

ovvero come si può procedere per
schematizzazioni e approssimazioni successive,
modellizzazioni concettuali e espedienti di laboratorio
(modo tipico di operare dei fisici)

- nella discussione precedente ci siamo riferiti ad esperimenti fatti in un laboratorio sulla superficie della terra



la terra è un riferimento inerziale?

- secondo la nostra definizione **sembrerebbe di no**, visto che un corpo libero cade! ma in realtà sappiamo che ciò è dovuto alla forza peso
- appoggiando il corpo su un piano la forza peso è cancellata dalla reazione vincolare: per movimenti **sul piano dovrebbe valere il principio d'inerzia**
- ma se si bilancia la forza peso con la reazione vincolare, l'attrito rallenta il moto rettilineo uniforme, **in apparente contrasto col principio d'inerzia**
- se si elimina anche l'attrito (ghiaccio, cuscino d'aria...), al limite finalmente pensiamo di poter affermare che **la terra rappresenta un sistema inerziale**
- **in realtà no**, visto che la terra gira su se stessa (forze apparenti)
- è però possibile (**localmente**) annullare la forza peso proprio grazie alle forze apparenti: i satelliti artificiali realizzano **l'assenza di gravità**, in essi si può osservare in pratica il **moto rettilineo uniforme dei corpi liberi**



inerzia e conservazione

Nella fisica moderna, il principio di inerzia si esprime attraverso la conservazione della quantità di moto

$$\vec{q} = m\vec{v}$$

la quantità di moto di un sistema isolato è costante

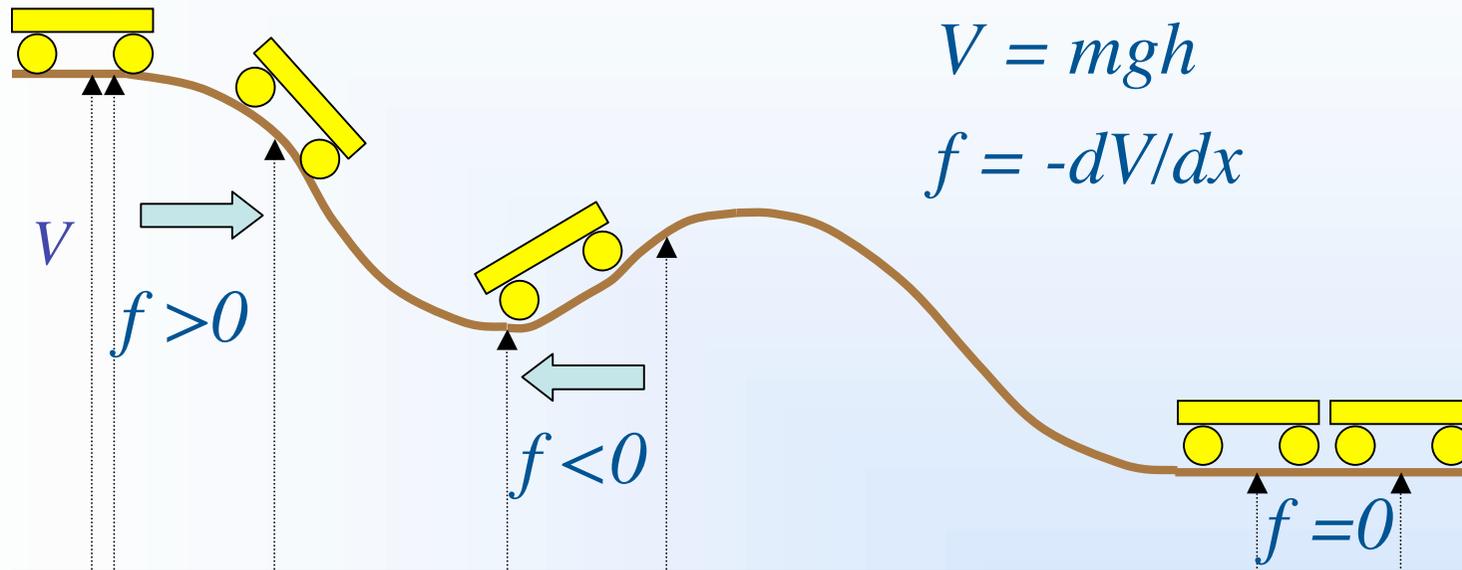
(questa forma del principio d'inerzia è più generale)

vedremo ora come questa conservazione a sua volta è ricollegabile all'uniformità dello spazio vuoto

forza come derivata del potenziale



le montagne russe e l'energia potenziale



l'energia potenziale diminuisce:
la velocità aumenta

l'energia potenziale aumenta:
la velocità diminuisce

l'energia potenziale è costante:
il moto è uniforme



uniformità e conservazione

- L'uniformità dello spazio implica che l'energia potenziale dello spazio vuoto debba essere costante
 - ⇒ potenziale uniforme = assenza di forze
 - ⇒ conservazione della quantità di moto

$$f = -dV/dx, V \text{ uniforme nello spazio} \Rightarrow f = 0$$

$$f = dq/dt = mdv/dt = ma$$

$$f = 0 \Rightarrow q \text{ costante nel tempo} \Rightarrow \text{velocità costante}$$



dalla metafisica alla fisica

Abbiamo spostato la nostra visione dello spazio

da un punto di vista metafisico

(spazio assoluto/relativo)

ad uno fisico:

l'uniformità si riferisce a proprietà fisiche misurabili



ma lo spazio è uniforme?

- l'uniformità dello spazio non è una cosa tanto ovvia: la presenza della terra per i corpi che si trovano sulla sua superficie (la presenza del sole per i pianeti) fa sì che si generino **forze che dipendono dalla posizione nello spazio**
- di nuovo, in linea di principio, possiamo pensare che se ci allontaniamo dagli altri corpi, se ci mettiamo nello spazio vuoto, questo deve essere uniforme



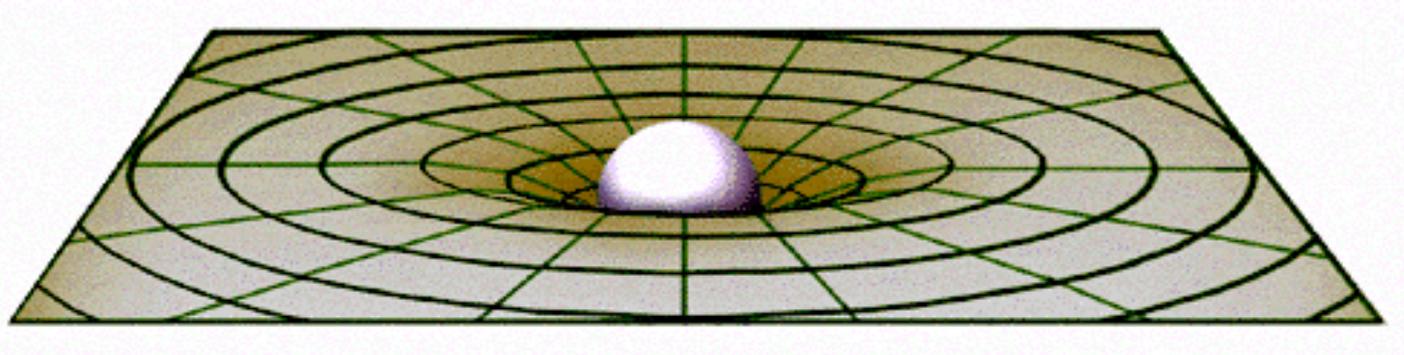
e allora potremmo addirittura concepire
la presenza di un corpo pesante come
qualcosa che modifica la geometria dello
spazio vuoto

(relatività generale)

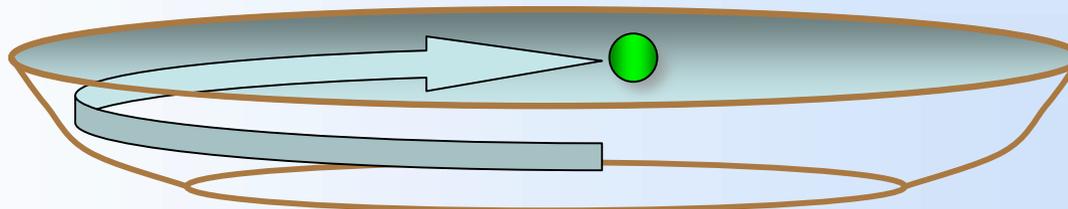




la massa del sole incurva lo spazio
circostante



la traiettoria della terra è una circonferenza, come
quella di una pallina lanciata nella roulette





le forze "derivate" da proprietà connesse con la posizione nello spazio

- energia potenziale = energia di posizione
- un corpo è soggetto a forze in quanto si trova in una certa posizione dello spazio, che costituisce quindi un campo di forze, il corpo interagisce col campo di forze
- azione di contatto/azione a distanza: la fisica moderna, basata sulle teorie di campo, sostanzialmente rifiuta la seconda interpretazione (che peraltro è incompatibile con la relatività ristretta)
- come avviene allora l'interazione tra sole e terra? o quella tra un protone positivo ed un elettrone negativo?

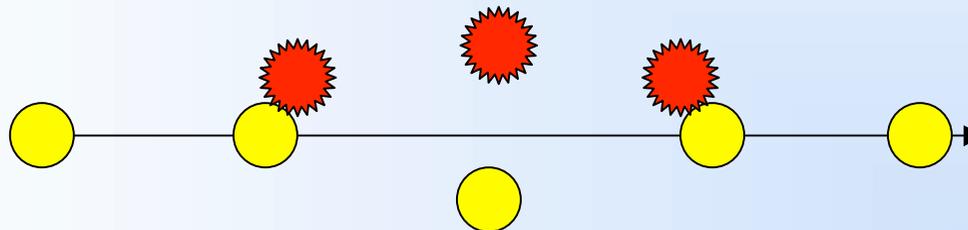


il campo di forze

consideriamo una particella carica che si muove nello spazio:



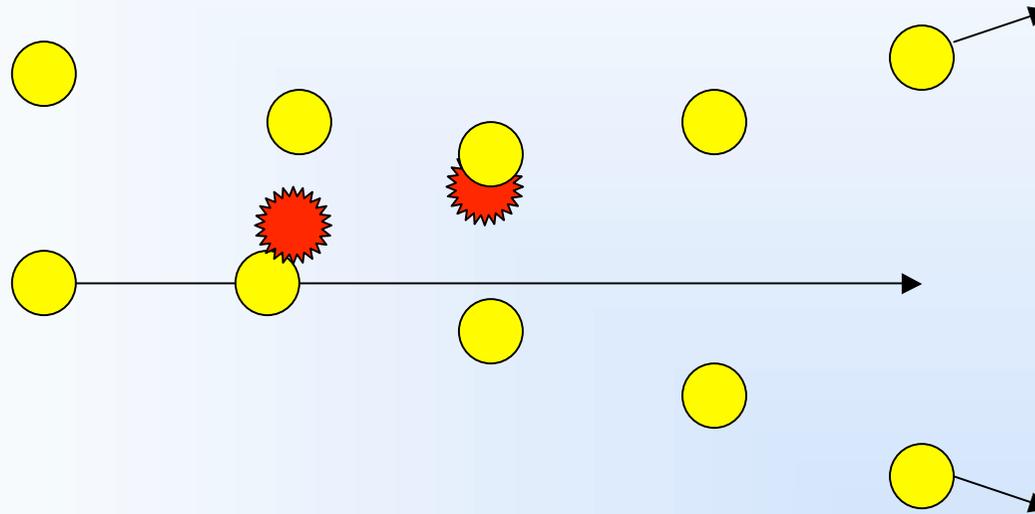
nel suo moto la particella genera un campo di forze, emettendo e riassorbendo continuamente dei fotoni, i quanti del campo elettromagnetico





interazione tra particella e campo di forze

se una seconda particella carica si avvicina, può assorbire il fotone, ed essere deviata da esso:



l'interazione tra particella e campo di forze è sempre "locale", ossia avviene in un punto dello spazio

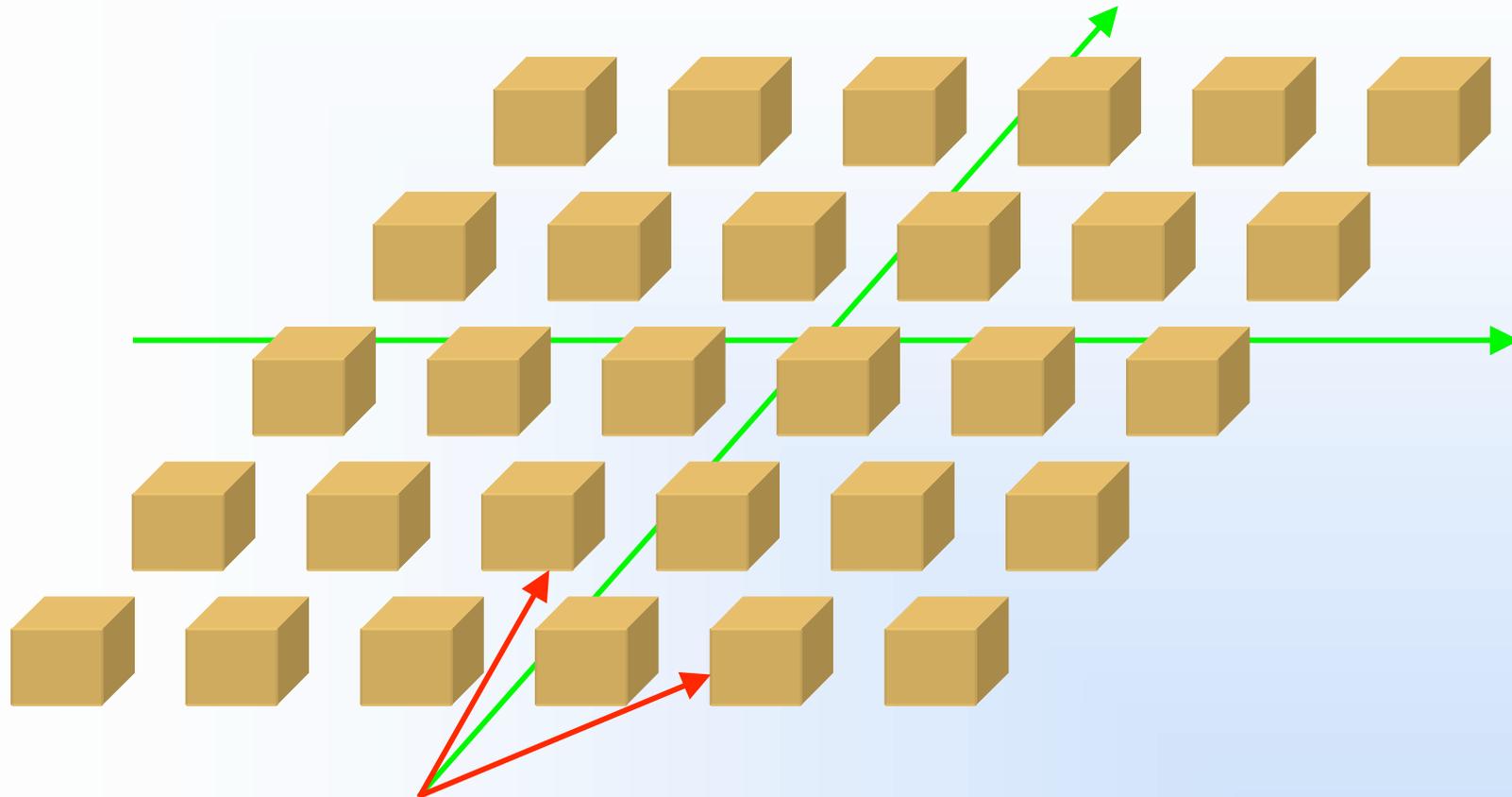


nuovi strumenti concettuali

- Tornando al principio di inerzia, qualcuno potrebbe dire: ma alla fine, con questa storia dell'uniformità, abbiamo solo reinterpretato una cosa ovvia, come il moto rettilineo uniforme.
- Per capire invece la potenza del nuovo approccio, consideriamo un'altra proprietà dello spazio: l'isotropia.
- Che differenza c'è tra uniformità e isotropia?



uniformità e isotropia



la distribuzione spaziale è uniforme,
ma le direzioni non sono tutte equivalenti



isotropia dello spazio vuoto

- Le direzioni dello spazio sono tutte uguali
- di nuovo, questo non è vero per lo spazio sulla superficie della terra, dove esiste una direzione privilegiata che è la verticale (se appoggio una matita in verticale sul tavolo, questa acquista una rotazione, e cade!)
- nello spazio vuoto, invece, il potenziale non deve dipendere dalla direzione, per cui non possono esserci forze dirette nel senso in cui cambia la direzione



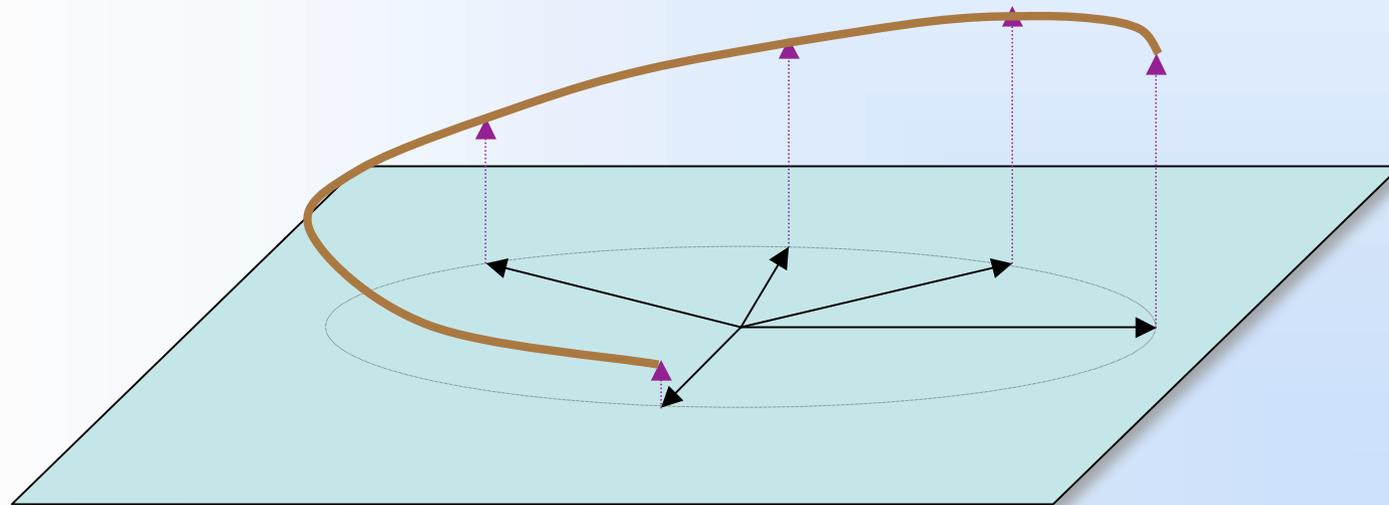
isotropia e rotazione

consideriamo le possibili direzioni su un piano

come ci aspettiamo che sia fatta l'energia potenziale?

- se il piano non fosse isotropo, l'energia potenziale potrebbe cambiare per ogni direzione
- otterremmo un binario di "montagna russa" a spirale: un carrellino, scendendo, ruoterebbe rispetto al centro

l'anisotropia genererebbe una rotazione

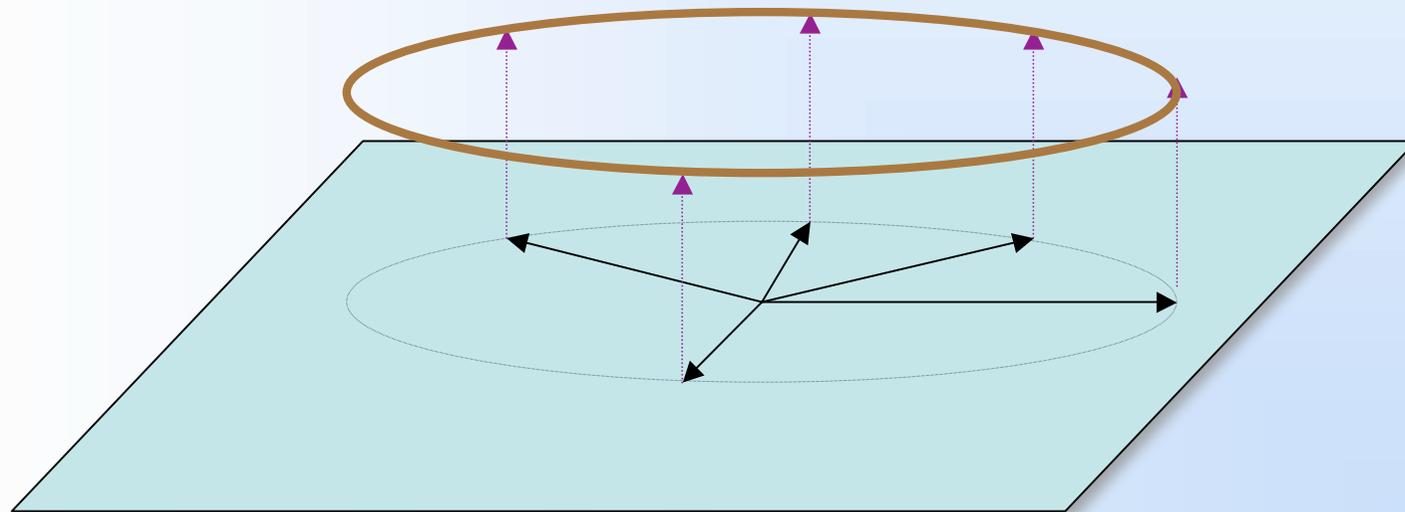




conservazione dello stato di rotazione

- se il piano è isotropo, l'energia potenziale è costante
- il binario della "montagna russa" è ora una circonferenza
- se il carrellino è fermo, rimane fermo, se è in moto, mantiene un moto circolare uniforme

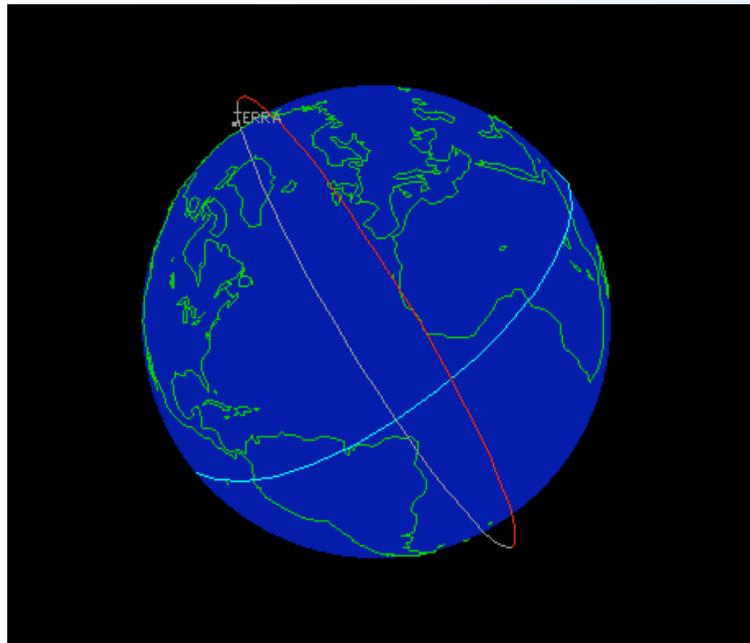
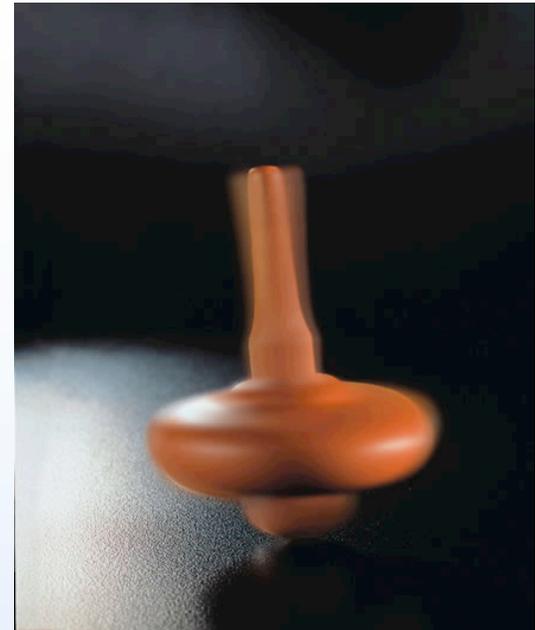
L'isotropia comporta la **conservazione dello stato di rotazione**





il momento angolare

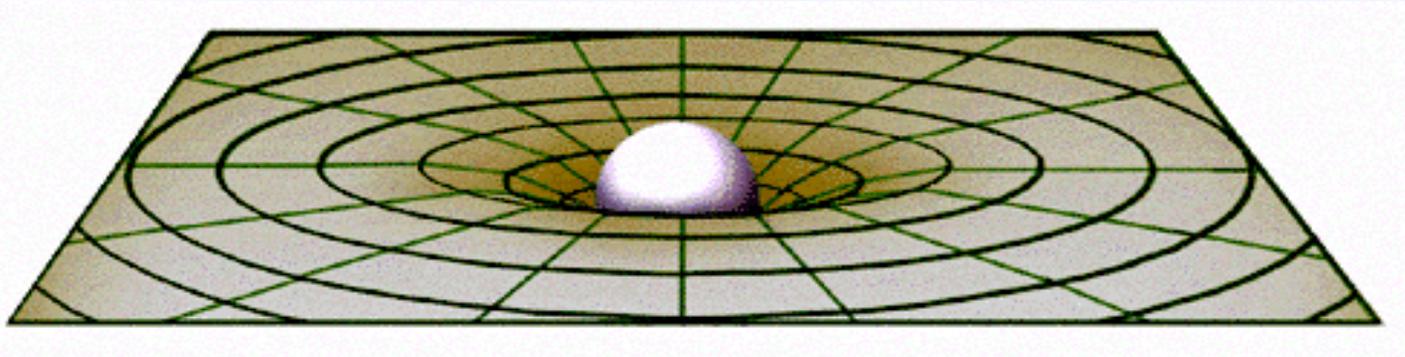
- La grandezza fisica che rappresenta lo stato di rotazione è il **momento angolare**, che si conserva per un sistema isolato





isotropia senza uniformità

la geometria dello spazio intorno ad una massa (il sole, la terra) non è omogenea, ma è isotropa:



- non si conserva la quantità di moto (un corpo fermo cade verso il centro della terra)
- si conserva il momento angolare (moto circolare dei satelliti)



invarianza e simmetria

l'uniformità e l'isotropia si possono considerare come delle proprietà di **invarianza**:

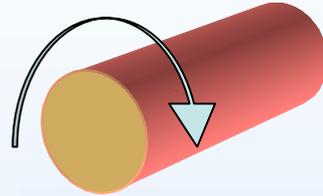
- lo spazio uniforme è invariante per traslazioni : le sue proprietà non cambiano in seguito ad una traslazione
- lo spazio isotropo è invariante per rotazioni: le sue proprietà non cambiano in seguito ad una rotazione

come si dice con linguaggio moderno, queste sono proprietà di **simmetria**: una simmetria è una trasformazione che lascia invariate alcune proprietà.

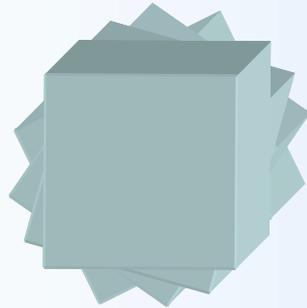


simmetrie geometriche

- simmetria di un cilindro (simmetria continua)



- simmetria di un cubo, o di un cristallo (simmetria discreta)



- simmetria dello specchio





un teorema generale

- dunque abbiamo visto che l'invarianza dell'energia potenziale per traslazioni o per rotazioni genera la conservazione rispettivamente della quantità di moto e del momento angolare
- questi non sono che due casi particolari di un teorema molto generale della fisica matematica moderna; ogni invarianza (ogni simmetria) corrisponde ad una quantità conservata.



ancora sulla simmetria speculare

- In coordinate cartesiane, l'immagine speculare si ottiene invertendo la direzione di uno dei tre assi
- nessuna rotazione può riportare l'oggetto speculare a coincidere con l'oggetto originale
- ma se ora cambiamo la direzione di un secondo asse, otteniamo di nuovo (a meno di rotazioni) l'immagine originale
- se cambiamo la direzione del terzo asse, di nuovo abbiamo un oggetto non sovrapponibile all'oggetto originale
- questo è il motivo per cui si usa il termine "parità spaziale": un numero dispari di inversioni genera l'immagine speculare, un numero pari riporta all'immagine originale



destra, sinistra e parità

- si dice spesso che lo specchio scambia la **destra** con la **sinistra**
- ma allora sarebbe lecito domandarsi: e perché non scambia l'**alto** col **basso**? in fondo io mi posso sdraiare per terra, per cui l'alto va a destra ecc.
- naturalmente, l'unica cosa che scambia lo specchio è **avanti e dietro!**
- e allora, da dove nasce la sensazione dello scambio di destra e sinistra?



simmetrie umane?

- se ruotiamo l'oggetto speculare intorno ad un asse verticale, ribaltiamo avanti-dietro, per cui ora avanti-dietro e alto-basso sono gli stessi dell'oggetto originale, ma abbiamo scambiato destra e sinistra
- naturalmente potremmo ruotare l'oggetto speculare intorno ad un asse orizzontale, così avremmo coincidenza tra destra-sinistra e tra avanti-dietro, ma scambiato alto-basso!
- noi però siamo (quasi) simmetrici tra destra e sinistra, per cui la prima operazione ci sembra più naturale della seconda.
- Il problema quindi è che psicologicamente noi definiamo d e s rispetto a al-b o av-d.



pseudovettori

- da un punto di vista matematico, possiamo dire che noi definiamo d - s in base al prodotto vettoriale di a - b e a - d
- ed infatti i prodotti vettoriali si comportano in maniera opposta ai vettori ordinari sotto la parità: sono quindi degli pseudo-vettori
- ora possiamo notare che alcune componenti dei vettori cambiano, altre no! e quelle degli pseudovettori si comportano in maniera opposta.
- se ora applichiamo due volte la parità, abbiamo ancora che alcune componenti dei vettori cambiano, altre no; ma ora anche le componenti degli pseudovettori cambiano allo stesso modo
- infine, se applichiamo tre volte la parità, tutte le componenti del vettore si invertono per cui il vettore cambia segno, mentre le tre componenti dello pseudovettore rimangono immutate



scalari e pseudoscalari

- tutte le considerazioni fatte si applicano alle grandezze fisiche che sono vettori e a quelle che sono prodotti vettoriali (momento angolare, campo magnetico ecc.)
- la grandezza più semplice per definire la parità è il prodotto scalare: il prodotto scalare tra due vettori (o due pseudovettori) non cambia mai segno, (per esempio il modulo di un vettore), il prodotto scalare di un vettore e di uno pseudovettore cambia segno per un numero dispari di "parità"
- il primo tipo di grandezza è quindi uno scalare, il secondo uno pseudoscalare.



violazioni di parità

- se vogliamo testare la conservazione o la violazione della parità per determinate reazioni fisiche, dobbiamo quindi misurare grandezze pseudoscalari, ossia prodotti di vettori con pseudovettori:
- se la parità è conservata, una reazione fisica non deve dipendere da pseudoscalari
- La violazione della parità nelle interazioni deboli è determinata infatti proprio dalla dipendenza di queste reazioni da una di tali grandezze (il prodotto scalare dell'impulso con lo spin, o elicità)