

## Pssc: sistemi di riferimento

Versione 0.2

Qui di seguito compaiono delle note che servono da breve riassunto del filmato. Sono accompagnate da domande e spunti di riflessione. I numeri con cui inizia ciascuna nota riguardano l'istante (minuti e secondi) dall'inizio del filmato cui la nota si riferisce. I numeri in grassetto indicano che la nota è importante e solleva questioni generali che andranno approfondite. Sono graditi suggerimenti ed eventuali correzioni.

2:03 Che cosa è un sistema di riferimento (sdr)? Come è possibile descrivere il moto di un corpo? A che serve la terna di assi cartesiani che nel filmato è tenuta in mano dallo sperimentatore? Cosa rappresenta?

2:44 -Tutti i moti sono relativi- In che senso? Fare degli esempi.

3:05 Quali sono i sdr che consideriamo privilegiati? Se sono in movimento, me ne accorgo sempre? La domanda precedente non è ambigua? La Terra gira intorno al Sole. Come facciamo a saperlo? Non sembra ferma? Come facciamo a convincere uno che non ci crede?

3:50 La terra è sferica. La direzione che noi chiamiamo su, per uno che sta ai nostri antipodi, è giù. Come si fa a sapere che la Terra è sferica? Quali sono le prove? Non potremmo essere tutti vittime di un complotto internazionale volto alla negazione di una realtà evidente (è piatta...!)? Quando e come, per la prima volta, gli esseri umani sono giunti alla conclusione corretta?

4:25 sdr<sub>t</sub> = sistema di riferimento solidale alla Terra. sdr<sub>c</sub> = sistema di riferimento del carrello. Il carrello è fermo rispetto alla terra. Che moto fa la pallina che cade?

5:00 Il carrello si muove a velocità costante. Rispetto a chi?

5:33 La pallina cade. Dove è il suo punto di arrivo rispetto al piano del carrello e alla sbarretta verticale che la sosteneva?

5:42 La pallina è caduta in verticale?

6:15 Che moto fa la pallina nel sdr<sub>t</sub>?

6:46 Che moto fa la pallina nel sdr<sub>c</sub>?

7:07 Perché lo sperimentatore decide di stare sullo sfondo mentre la cinepresa riprende la caduta della pallina?

**7:35** -Nel sdr<sub>c</sub> avrete visto che la traiettoria di caduta è stata una retta verticale esattamente come quella di prima, quando abbiamo fatto l'esperimento con il carrello fisso. Se noi ci trovassimo in questo sdr senza vedere quello che c'è intorno, non potremmo accorgerci con questo esperimento che stiamo muovendoci con velocità costante. In effetti nessun esperimento ci potrebbe dire che stiamo muovendoci con velocità costante.- Velocità costante, ma rispetto a chi? Come fa lo sperimentatore a sapere che *nessun esperimento concepibile* sarebbe in grado di evidenziare il moto del carrello?

8:15 Esperimento ripetuto senza il corpo dello sperimentatore che fa da sfondo. Il carrello si muove o no? Rispetto a chi? Come facciamo ad esserne sicuri?

**8:40** -Tutti i sdr che si muovono a velocità costante l'uno rispetto all'altro sono equivalenti.- In che senso?

9:40 Scegliendo un sdr in maniera opportuna, è più semplice descrivere alcuni tipi di moto. Il moto circolare uniforme della sagoma circolare bianca sul disco nero e la cicloide.

10:00 Velocità di un corpo vista da due sdr diversi che si muovono a velocità costante l'uno rispetto all'altro.

**10:15** Moto del disco a ghiaccio secco (dgs). Legge di inerzia: -un oggetto si muove a velocità costante se non è turbato da alcuna forza.- A velocità costante rispetto a chi? Cosa è una forza? Una spinta? Una volta che si è esaurita la spinta, un corpo si ferma? Per poter continuare a muoversi, ha bisogno di una spinta continua? Di una spinta ogni tanto?

10:54 Il tavolo è in moto. la velocità del dgs è la stessa rispetto a prima? La spinta che lo sperimentatore ha inferto al dgs è la stessa di prima?

11:12 Come appare lo stesso esperimento nel sdr<sub>t</sub>? Quali sono ora le velocità di andata e ritorno del dgs?

12:03 Spiegazione alla lavagna dell'esperimento sulle velocità relative. Le idee sul moto relativo di A.Einstein.

13:10 sdr<sub>c</sub> ora è un sdr accelerato rispetto alla Terra. Cosa è una accelerazione?

13:52 Al termine della caduta, dove si è fermata la pallina?

14:09 Stesso esperimento visto nel sdr<sub>c</sub>. Come si spiega il moto della pallina? Quale è l'unica forza che agisce sulla pallina? Come facciamo a sapere che c'è solo quella?

**14:53** -Se la legge di inerzia deve valere, ci deve essere una forza che spinge la pallina in questo verso (in direzione opposta al moto del carrello) per farla deviare dalla traiettoria verticale. Ma che razza di forza è...? Non è una forza di quelle che conosciamo. Non ci resta che concludere che *non c'è alcuna forza*.- Trovate questa argomentazione soddisfacente? Non potrebbe esistere una nuova forza sconosciuta? Come possiamo escludere questa eventualità? In effetti sarebbe una forza particolare: nel sdr<sub>c</sub> la osserveremmo, nel sdr<sub>t</sub> no. Le forze della Natura (gravitazionale, elettromagnetica, ad esempio) sono osservabili in tutti i sdr? Sono le stesse in tutti i sdr (potrebbero variare in verso e in intensità)? Esistono sdr nei quali non sono osservabili?

15:20 Caso di un sdr in cui non vale la legge di inerzia. Come sono definiti i sistemi di riferimento inerziali? *Come si fa a sapere se ci troviamo su un sdr inerziale?*

**15:35** La legge di inerzia è valida nel sdr, quindi esso è un sdr inerziale. **ATTENZIONE:** tale affermazione deve essere discussa con il prof. Inoltre: vedi più avanti nel filmato, in particolare al minuto 19:11 e al 21:23.

16:00 Se supponiamo che il carrello sia fermo, ci deve essere una forza che spinge la pallina di lato. Il carrello in realtà si muove con accelerazione costante rispetto al sdr. La forza che supponiamo esistere nel sdr è detta forza apparente.

17:00 Moto del dgs su un sistema rotante. Il moto è osservato sia rispetto al tavolo (che ruota), sia rispetto al sdr. Rispetto al sdr il dgs si muove in linea retta e con velocità costante.

19:11 Un sistema rotante, anche se la velocità di rotazione è costante, non è inerziale. Un corpo che si muove di moto circolare uniforme (ma rispetto a chi?) è soggetto ad una accelerazione centripeta (e non centrifuga! Approfondire con il prof.)

**19:48** Il disco è tenuto fermo sul tavolo rotante da un elastico e un lapis. Nel sdr l'elastico è allungato, quindi il dgs è soggetto ad una forza centripeta. Anche nel sdr del tavolo l'elastico è allungato, quindi anche lì il dgs è soggetto ad una forza centripeta. Però nel sdr del tavolo il disco *sta fermo*, deve quindi esistere un'altra forza uguale in intensità e opposta alla prima (quindi una forza centrifuga) che la bilancia esattamente. La forza centrifuga è una forza apparente.

20:40 Quando lo sperimentatore cessa di esercitare la forza centripeta, che moto fa il dgs? Descriverlo nel sdr e in quello del tavolo rotante.

**21:23** -Un sistema rotante non è un sistema inerziale- La Terra ruota su se stessa e intorno al Sole, quindi non è un sdr inerziale. Un sdr fisso rispetto al Sole è un sdr inerziale?

21:42 -Ma allora perchè sembra che su un sdr fisso rispetto alla Terra la legge di inerzia sia valida? Perchè non osserviamo forze apparenti? Perchè queste dipendono dall'accelerazione del sdr non inerziale. Più piccola è l'accelerazione, più piccoli sono gli effetti. Stima della forza apparente che agisce su un corpo all'equatore.

**23:04** La Terra accelera anche verso il Sole. Quanto è grande questa accelerazione? Attenzione a non essere ingannati: siamo in caduta libera sul Sole (discuterne con il prof.).

23:15 Chi è che ruota, la Terra o il cielo stellato? Dimostrazione rotazione terrestre: il pendolo di Foucault. Guardare quali erano le argomentazioni al proposito di E.Mach.

24:13 Pendolo su piattaforma rotante. Il piano di oscillazione rimane fisso rispetto alla terra (o no?). La base della piattaforma gli ruota sotto.

25:30 Riassunto. Sdr inerziale: sdr in cui vale il principio di inerzia. Tutti i sdr che si muovono con velocità costante rispetto ad esso, sono anch'essi inerziali.

26:00 Sdr non inerziali. Quali sono? Cosa sono le forze apparenti e perchè vengono introdotte.

## Il tavolo rotante

**1:** Il dgs è fermo nel sdr del laboratorio e il suo centro è allineato con l'asse di rotazione del tavolo. Che moto fa nel sdr del tavolo? **2:** Il dgs è fermo nel sdr del laboratorio e il suo centro NON è allineato con l'asse di rotazione del tavolo. Che moto fa nel sdr del tavolo? **3:** Il dgs si muove di moto rettilineo uniforme nel sdr del laboratorio. Qualitativamente, che moto fa nel sdr del tavolo? **4:** Perchè per tenere il dgs fermo nel sdr del tavolo occorrono un elastico ed un lapis? Se il dgs è fermo nel sdr del tavolo, che moto fa nel sdr del laboratorio? Quando lo sperimentatore solleva il lapis e lascia andare il dgs, questo che moto fa nel sdr del laboratorio? E in quello del tavolo?

## Cinematica newtoniana

### Tempo assoluto

Il punto di partenza è la frase di Newton che ho già citato nella prima lezione, e che ora vi ripeto: “. . . in sè e per sua natura, senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente.” Notate che con la sensibilità di oggi una frase del genere non verrebbe in mente; e in ogni caso verrebbe subito in mente l'obiezione: uniformemente rispetto a che? Come faccio a dire che il tempo scorre uniformemente? Devo avere un termine di paragone. E' importante, dal punto di vista della storia della scienza e anche della storia della filosofia, osservare che ai tempi di Newton obiezioni di questo tipo non venivano sentite. O per essere più precisi, non erano molto sentite; erano sentite soltanto da qualcuno, e più a proposito dello spazio che del tempo. Quanto al tempo, l'asserzione di Newton appariva plausibile: il tempo c'è, esiste per conto suo, indipendentemente da noi, dai fenomeni, dal mondo, da quello che succede, ecc. Non solo è assoluto nel senso etimologico del termine (“absolutus” ovvero sciolto, senza legami), non è vincolato a niente, non dipende da niente; ma anche esiste

in sè. Nella cultura del 1600-1700 una tale concezione è del tutto naturale; ma voglio farvi notare che anche se in seguito, nel pensiero filosofico e scientifico, l'idea è stata riesaminata e discussa, ciò non toglie che sia così profondamente radicata nella nostra cultura, ad ogni livello, che ancor oggi ci riesce difficile accettare che le cose possano andare altrimenti. Se prendete il solito uomo della strada e gli ponete le domande giuste, vi accorgete che ha ben salda quest' idea del tempo assoluto: l'abbiamo tutti, compresi quelli che dovrebbero avere un'idea diversa perchè hanno studiato abbastanza. Sotto sotto, la nostra idea inconscia è quella che ha espresso Newton. (citato da E. Fabri: Insegnare relatività nel XXI secolo).

### **Spazio assoluto**

Per cominciare, diciamo subito cos'è lo spazio assoluto. Riprendiamo pari pari, sempre dai Principia, la frase di Newton: -Lo spazio assoluto, per sua natura senza relazione ad alcunchè di esterno, rimane sempre uguale e immobile . . . -

Anche in questo caso, chi la legge oggi si chiede subito: immobile rispetto a che? Però già ai tempi di Newton su questo si discuteva. Sappiamo tutti che Leibniz ebbe con Newton contrasti importanti, in particolare proprio su questo punto. Per Leibniz non ha senso parlare di spazio assoluto, ne' di moto e di quiete assoluta; il moto e la quiete si definiscono sempre rispetto a qualcos'altro, quindi dire spazio immobile è un non senso. Va detto però che le argomentazioni di Leibniz erano puramente filosofiche, e la fisica è andata avanti senza tenerne conto. La fisica del '700 e dell'800 è stata costruita proprio su questo paradigma: lo spazio è come un ambiente, un teatro; un insieme di postazioni, di pietre miliari, che stanno lì fisse, alle quali ci si riferisce quando si dice che una cosa sta ferma o si muove. Però attenzione: il fatto che Newton avesse costruito la sua fisica sullo spazio assoluto, non significa che non conoscesse il principio di relatività. Non poteva non conoscerlo perchè era stato enunciato più o meno 60 anni prima dei Principia; il principio di relatività è di Galileo e doveva essergli noto. Newton sapeva che in realtà se ci si mette in un sistema di riferimento che si muove di moto rettilineo uniforme rispetto al suo spazio assoluto, va tutto bene lo stesso. Il suo punto di vista era: lo spazio assoluto esiste; poi accade che se ci si mette in un riferimento in moto traslatorio rettilineo uniforme rispetto allo spazio assoluto, la fisica funziona bene anche lì. Però il vero moto e la vera quiete sono in relazione allo spazio assoluto. (citato da E. Fabri: Insegnare relatività nel XXI secolo).

### **Sistema di riferimento**

Ma che cos'è un sdr? Quando parlo di sdr, io intendo un ambiente, un laboratorio, quindi un oggetto fisico reale, materiale, realmente esistente, concretamente definito. Tra parentesi, un sdr dev'essere rigido: in un laboratorio che mi si deforma sotto il naso, fatto a fisarmonica, diventa problematico eseguire le misure o interpretarle. Intenderò inoltre che questo laboratorio-ambiente sia dotato di tutti gli strumenti di misura di cui ho bisogno. Per questo corso, i soli strumenti di misura di cui avremo bisogno saranno gli strumenti geometrici e gli orologi. Almeno all'inizio non ci servirà altro; più avanti potranno servire anche misuratori di energia, di massa, magari di altre grandezze fisiche. Ma in generale potrebbe servirmi di misurare cariche elettriche, campi. . . Dovete pensare che dentro un sdr, identificato come un laboratorio, una stanza, ci sono tutti gli strumenti che vi servono per fare delle misure, per fare un esperimento. Questo è un sdr (citato da E. Fabri: Insegnare relatività nel XXI secolo).

### **Sistema di riferimento inerziale (sdri):**

Sdr che si muove di moto rettilineo uniforme rispetto allo spazio assoluto. Attenzione: se A è un sdri e B si muove di moto rettilineo uniforme rispetto ad A, allora anche B è un sdri. Perchè?

### **Principio di inerzia:**

Un corpo non soggetto a forze si muove di moto rettilineo uniforme. Problema: il principio di inerzia in quali sdr è valido?

### **Principio di relatività:**

Nessun esperimento consente di distinguere due sdr che si muovono di moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro. Oppure: Tutti i fenomeni fisici seguono le stesse leggi in due sdr che si muovono di moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro.