

A quo moventur planetae?

- ❖ La necessità di un'azione per i moti curvilinei
 - ❖ l'idea di attrazione universale
 - ❖ la ricerca di una spiegazione unica per moti celesti e terrestri
-
- ✦ *L' anima motrix di Keplero:*
 - "Il Sole è il corpo più bello ... l'occhio del mondo ... la lanterna ... il focolare del mondo ... il primo motore dell'universo" [Rossi, 1984]*
 - ✦ *L'idea di moto indelebilmente impresso di Galileo*

“Chi ricorda la distinzione tra moti naturali e violenti?”

Sono naturali quelli intrapresi spontaneamente e violenti quelli che hanno bisogno di un'azione.

“Chi ricorda perché è così secondo Aristotele?”

Il moto naturale è quello che fa raggiungere a un oggetto il suo luogo.

“Il moto di un proiettile è naturale o violento?”

Violento, ma ...

“Come veniva concepito da Tycho il moto di un proiettile?”

Dapprima nessuno risponde; poi, dopo qualche cenno dell'insegnante, qualcuno ricorda l'esempio di Wyle Coyote: non cade finché non ha esaurito la spinta. L'insegnante precisa che l'idea era che non si intraprendesse il moto naturale fino a che non si fosse esaurito quello violento.

“E invece che cosa pensava Galileo di questo moto?”

Tutti ricordano che la traiettoria è una parabola.

“Sì, ma come arriva Galileo a questo risultato?”

Ricordano bene che il moto orizzontale resta nell'oggetto: è *insito*, dice qualcuno, è *indelebilmente impresso*; e, alcuni, ricordano anche che è un moto *composto*. Uno studente cita un brano di Galileo in cui il lettore è invitato a immaginare un piano perfettamente liscio, su cui un oggetto può essere mosso con un soffio. Altri aggiungono che il moto non cambia finché qualcosa non lo fa cambiare.

“In particolare che cosa non cambia?”

Rispondono la velocità.

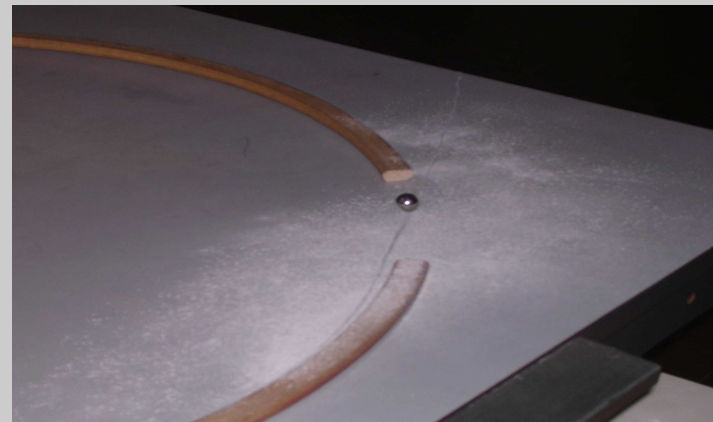
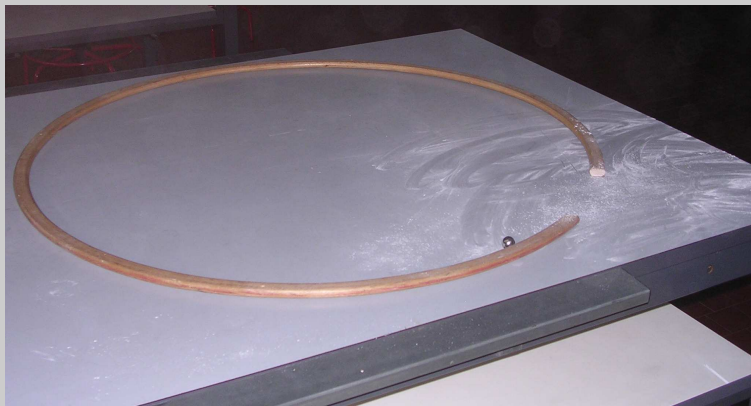
“E poi ?”

La direzione del moto.

*Cartesio,
Philosophiae Naturalis
Principia, 1643*



- Non è richiesta maggiore azione per il movimento che per il riposo.
- Dio è la causa del movimento e la quantità di questo si conserva.
- Prima legge della natura: Che ogni cosa resta nello stato in cui è, fino a che nulla cambia.
- La seconda legge della natura: che ogni corpo che si muove tende a continuare il suo movimento in linea retta ... e non già secondo una circolare



Cartesio osserva che i corpi non hanno da sé la natura di cessare il proprio moto ed è per ragioni nascoste ai nostri sensi che cessano. Questo è il motivo per cui noi “*abbiamo molta inclinazione a credere*” che il movimento abbia di per sé la natura di cessare; gli studenti aggiungono che, in effetti, l’attrito che fa fermare i corpi non è un’azione visibile, ma proprio nascosta ai nostri sensi, come dice Cartesio

Sembra per il momento chiaro a tutti che il moto non ha bisogno di essere mantenuto, ma vedremo che in realtà molti la pensano così perché sono convinti che *ci sia sempre qualcosa che lo mantiene!*

Su un’espressione di Cartesio l’insegnante ha ritenuto necessario soffermarsi: egli dice che quando un corpo ha cominciato a muoversi non cesserà di muoversi “*con la stessa forza*”, a meno che qualcosa non intervenga a ritardarlo o arrestarlo. **Con quale significato è qui usata la parola *forza*?** È stata la domanda posta dall’insegnante agli studenti; e loro hanno risposto prontamente che avrebbe dovuto dire velocità. Nonostante questa risposta corretta è ancora lungo il percorso che porterà a tenere ben distinti i due concetti di forza e velocità.

**“Che cosa fa deviare continuamente i
pianeti
dal moto uniforme in linea retta?”**

A quo moventur planetae?

*Se il moto circolare ha bisogno di una causa a maggior ragione il
moto lungo un'orbita ellittica*

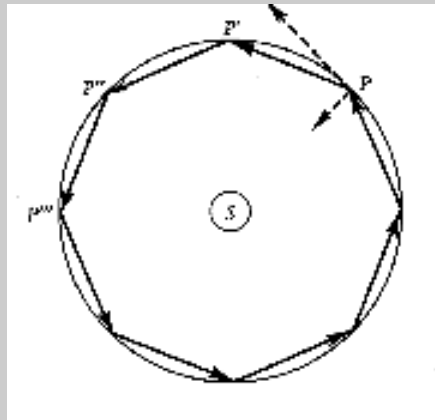
- *Ci vuole un'azione sul pianeta*
- *Il moto del pianeta non è naturale*
-

Robert Hooke (1635-1703)

non ci sono ritratti!

"Nell'opera di Hooke [...] la spiegazione del moto planetario era diventata un problema di meccanica applicata, identico in linea di principio ai problemi terrestri del pendolo e del proiettile. Sperimentazioni terrestri producono una conoscenza diretta dei cieli e osservazioni celesti danno informazioni applicabili direttamente sulla Terra" [Kuhn, ib]

"Sfacelo della dicotomia terrestre-celeste"



Il moto del pianeta sull'orbita circolare può essere concepito, con buona approssimazione, come il risultato di un moto uniforme in linea retta su cui interviene periodicamente una brusca spinta in direzione del Sole; l'approssimazione sarà tanto migliore quanto più frequenti, vicine tra loro saranno le spinte. E' evidente, dice Kuhn, che è solo una suggestione: Hooke non precisa quantitativamente la sua idea, e non risulta che lo abbia mai fatto; ma si è ritenuto che fosse giusto far ripercorrere agli studenti questa strada, proprio con l'obiettivo di una piena comprensione di ciò che sarà la gravitazione universale in Newton, per ottenere un affinamento progressivo di un'idea, di un concetto, con il contributo di diverse menti, e non una definizione completa e già pronta data tutta in una volta.

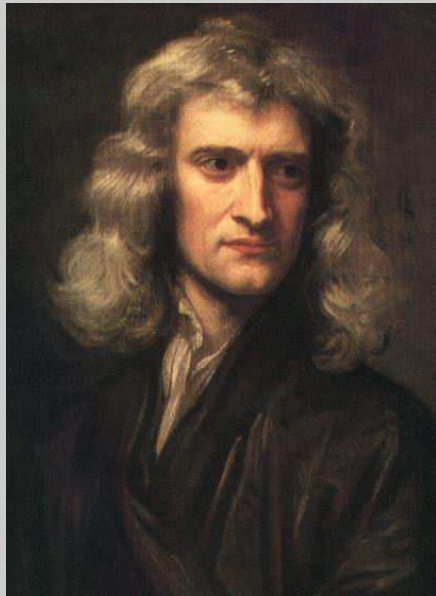
R. Hooke conclude la conferenza alla Royal Society del 1666 presentando un modello meccanico: il pendolo conico

- ✦ **Visualizzazione in laboratorio**
- ✦ *Quale forza tiene il pendolo sulla traiettoria circolare?*

Analisi delle forze agenti in diverse situazioni dinamiche
saper riconoscere forze in situazioni d'equilibrio è cosa ben diversa dall'esame delle forze su un oggetto che si muove!

- ★ **Borelli:** “In primo luogo ci si chiede per quale necessità i pianeti non abbandonino mai i cerchi da loro una volta descritti, o allontanandosi dal globo intorno al quale ruotano per percorrere l’universo in differenti direzioni, o muovendosi verso il globo intorno a cui ruotano fino a unirsi con esso. [...] Otterremo tale risultato supponendo [...]...che i pianeti abbiano un appetito naturale ad unirsi al globo attorno a cui ruotano, e che tendano con tutte le loro forze ad approssimarsi ad esso, i pianeti al Sole e gli astri a Giove.”
- ★ **Hooke:** “In primo luogo, tutti assolutamente i corpi celesti possiedono un’attrazione o forza gravitazionale verso i loro propri centri [...]. La seconda ipotesi è questa: che tutti assolutamente i corpi dotati di un moto semplice e rettilineo continueranno ad avanzare in linea retta, finché, da qualche altra forza efficace, non vengono fatti deviare e curvare in un moto descrivente un circolo, un’ellisse o qualche altra curva composta. La terza ipotesi è: queste forze d’attrazione hanno un effetto tanto più potente, quanto più il corpo su cui agiscono è vicino al loro centro.”

Isaac Newton (1642-1727)



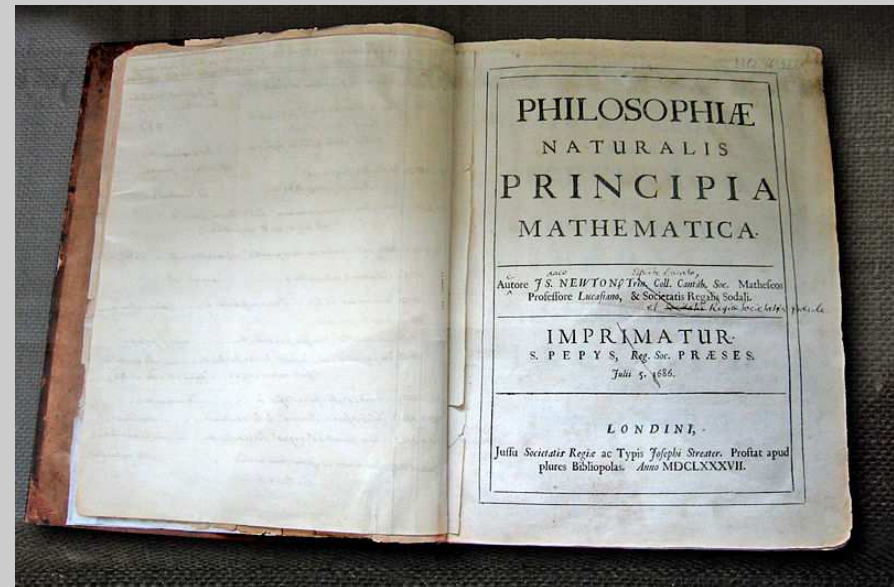
Edmond Halley nel 1684
fa visita a Newton...

“L’Ulisse che ha tirato fuori un simile Achille”

Dopo gli “*anni di silenzio*” il problema posto da Halley
“*s’impadronì di lui come nessun’altra cosa prima di
allora, con un’intensità tale che egli non potè
resistervi*”

[R.S. Westfall, *Newton*, Einaudi, 1989]

*Philosophiae Naturalis
Principia Mathematica*



Corrispondenza con Hooke (1679)

La testimonianza della comunicazione di idee tra studiosi, del dibattito vivace su di esse è utile a costruire quell'immagine corretta del modo di operare della scienza che abbiamo dichiarato fin dall'inizio come obiettivo di questa esperienza didattica

Tra i temi del carteggio la proposta di Newton di un esperimento per provare la rotazione terrestre (esperimento del Guglielmini, si riprende il tema trattato in Galileo secondo il quale era impossibile stando sulla Terra rivelarne il moto...)

La prima legge del moto



“Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare”

"Nessun altro tipo di movimento, né quello circolare né quello rotatorio, anche quando fosse uniforme, può essere considerato uno status, per quanto il movimento rotatorio sembri capace di conservarsi addirittura più a lungo di quello rettilineo, che, almeno nella nostra esperienza si estingue sempre piuttosto rapidamente.

In realtà, come già molti secoli prima i Greci avevano osservato, l'unico moto perpetuo che si incontra in questo mondo è il moto circolare del cielo. [...] Sbagliavano, naturalmente, ma non come a prima vista potrebbe sembrare.

In fondo si deve riconoscere che per il loro mondo, un mondo finito, avevano ragione: la legge d'inerzia postula infatti un mondo infinito. E questo non va dimenticato se non si vuole correre il rischio di essere ingiusti verso quanti non riuscirono a liberarsi dal fascino della circolarità."

[A. Koyré, Studi newtoniani, Einaudi, 1972]

Solo il moto uniforme *in directum* è uno *status*, non ha bisogno di una causa

Il moto circolare non è uno *status*:

"nel senso comune il moto circolare è percepito come uno stato di equilibrio"

[R.S. Westfall, ib]

***"E' presente accelerazione
nel moto circolare?"***

Si considerano i tipi di moto già conosciuti

**Necessità di concepire in modo nuovo
velocità e accelerazione**

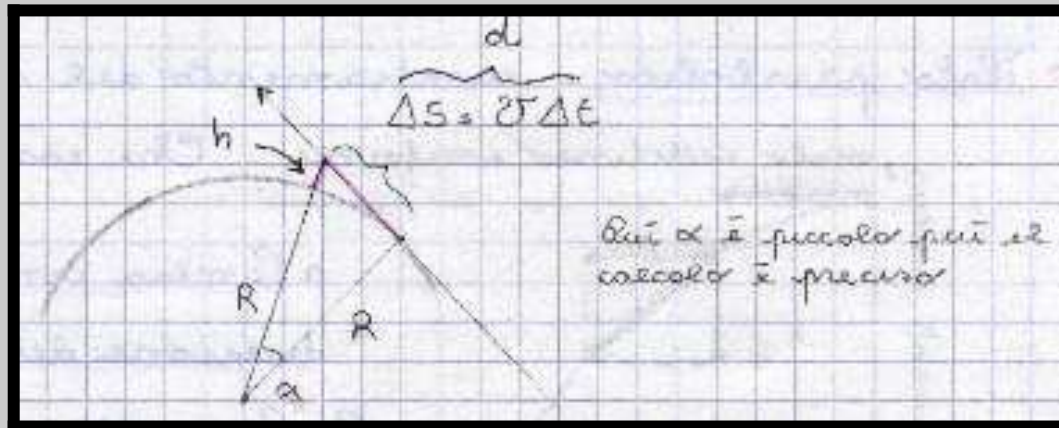
Si chiede che gli studenti provino a riflettere e rispondere personalmente a casa. Gli studenti, in base alle loro risposte, si sono divisi in due gruppi:

- ✦ quelli che hanno affermato che essendo la velocità definita come Dv/Dt , e non essendoci per definizione Dv , l'accelerazione non può che essere nulla;

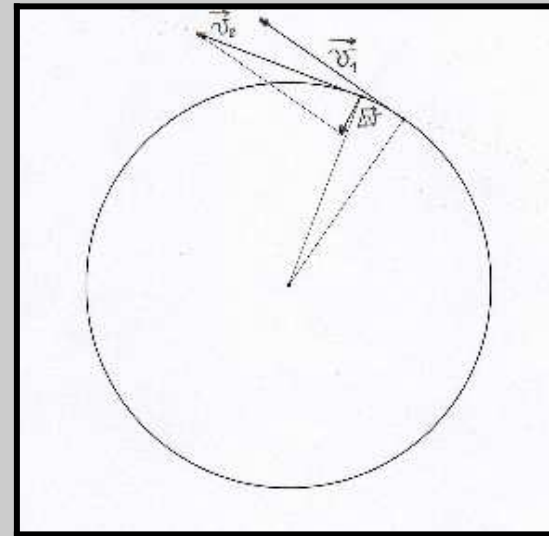
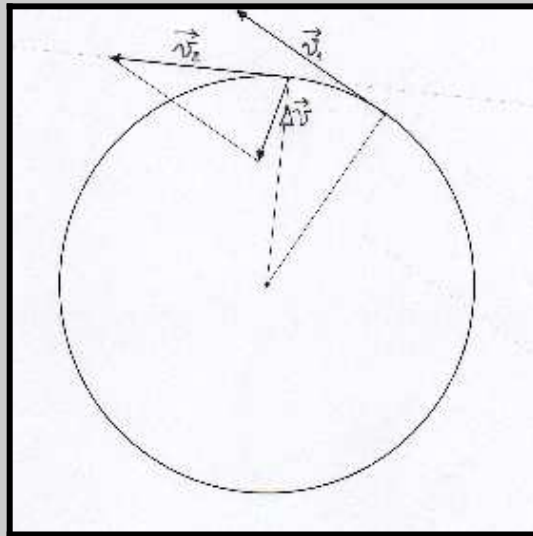
- ✦ quelli che si sono convinti che c'è accelerazione, altrimenti il moto sarebbe rettilineo e uniforme; tra questi, alcuni hanno anche precisato che il moto circolare uniforme è il risultato di un moto rettilineo uniforme su cui interviene una forza verso il centro

Costruzione del nuovo concetto di accelerazione nel moto curvilineo

Il moto circolare come moto composto...



Determinazione dell'accelerazione verso il centro e costruzione del vettore accelerazione (CABRI)



Osservazioni:

- non è banale costruire il vettore velocità...
- La differenza tra vettori si definisce in questa occasione


Il concetto di forza impressa, la massa inerziale, la seconda legge del moto

"Il cambiamento del moto è proporzionale alla forza motrice impressa ed avviene nella direzione della linea retta secondo la quale quella forza è stata impressa"

"Una forza impressa è una azione esercitata su un corpo che gli fa cambiare il suo stato di quiete o di moto uniforme lungo una linea retta. Questa forza consiste soltanto nell'azione e, cessata l'azione, non rimane nel corpo"

Newton sembra proprio rivolgersi ai nostri studenti,
quando precisa che la forza *non rimane nel corpo!*

7)



IL PIANO è RUVIDO

NOTE: di solito, l'anno scorso, studiammo sempre casi in cui non c'era la FORZA d'ATTEITO; in questo caso quel tipo di forza è presente perché il piano su cui poggia l'oggetto è ruvido.

- inoltre ricordo che la spinta che fa muovere l'oggetto non rimane nel corpo.

e allora cosa è F_{spinta} ??

Traspare da questa precisazione la consapevolezza della **necessità di un cambiamento concettuale profondo** che conduca, appunto, a *definire* la forza in modo radicalmente diverso da ciò che il senso comune suggerisce

Il concetto di forza, secondo M. Jammer [*Storia del concetto di forza*, Feltrinelli, 1979], è centrale nella storia della Fisica e la sua **definizione esatta, come quella di qualunque altro concetto in ambito scientifico, costituisce uno stadio avanzato dello sviluppo del concetto**

Da queste considerazioni discende la necessità di offrire molteplici occasioni di riflessione agli studenti, su tempi distesi, per cogliere consapevolmente il senso della definizione, qui per il caso della forza, così come per altri concetti fisici.

Per enfatizzare il cambiamento concettuale insito in questa definizione l'insegnante ha proposto che essa fosse affissa in classe su un cartellone, proposta accolta e realizzata dagli studenti

Con la premessa:
per tutti i medievali!

Galileo

Tutti gli oggetti cadono con la stessa accelerazione

Diversa forza impressa, stesso cambiamento del moto ...

“Che cosa possiamo concludere?”

i corpi rispondono diversamente, esiste una proprietà degli oggetti, è il rapporto tra forza impressa e accelerazione.

$$\vec{a} \propto \frac{\vec{F}}{m}$$

NON si sono svolte prove sperimentali della seconda legge della dinamica ...

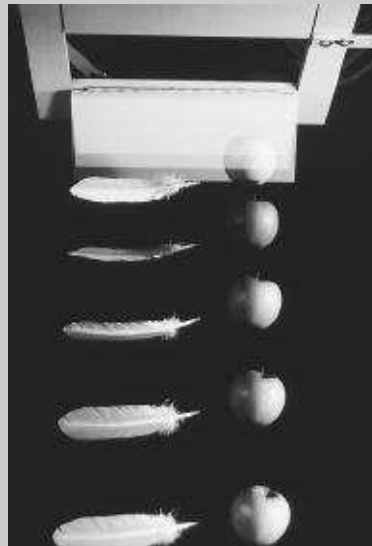
Newton nei Principia non dà alcuna dimostrazione, alcuna prova sperimentale della seconda legge, limitandosi ad attribuirla, insieme alla prima legge, a Galileo e Huygens [Jammer, 1979; Koyré, 1976; Geymonat, 1988]; Cohen [1974] osserva che Newton è molto generoso in questa attribuzione e che "se è vero che si può sostenere che Galileo fosse in possesso della legge d'inerzia [...] è necessario un grande sforzo d'immaginazione per far risalire a Galileo anche la seconda legge".

Il significato della terza legge di Keplero

Tutti i corpi orbitanti obbediscono alla terza legge di Keplero: da ciò si deduce, nel caso semplificato del moto circolare uniforme, che l'accelerazione dipende solo dalla posizione del corpo orbitante

⇒ L'accelerazione dei corpi celesti non dipende dal corpo attratto

... *come l'accelerazione di caduta libera*



La forza di attrazione gravitazionale,
come la forza di gravità sulla Terra,
è proporzionale alla massa inerziale

... stranezza...

Riflessione (difficile) su
INERZIA e GRAVITA'

“nello spazio i corpi non incontrano
resistenza”

Terza legge del moto

“Ad un’azione corrisponde sempre una reazione uguale e contraria, ovvero le azioni reciproche di due corpi sono sempre uguali e dirette in direzioni opposte”

“I mutamenti provocati da tali azioni sono uguali non nelle velocità, ma nei moti dei corpi, ove, naturalmente, i corpi non siano altrimenti impediti. Infatti i mutamenti delle velocità [...] sono inversamente proporzionali alle masse”

Alcuni esempi di urto: se è difficile credere che l’azione reciproca, ad esempio, tra un TIR e una piccola vettura che si scontrano sia identica è perché in realtà, istintivamente, tendiamo a confrontare gli effetti delle forze e non le forze stesse.

Lasciando gli studenti liberi di esprimersi, qualcuno evidenzia ancora una certa confusione; ad esempio, uno afferma che “un corpo urtandone un altro non riuscirà sempre a muoverlo, lo farà solo se la forza supera la resistenza dell’altro”....

Cartesio:

“Se un corpo che si muove ne incontra un altro più forte di sé, non perde nulla del suo movimento, e se ne incontra un altro più debole che egli possa muovere, ne perde tanto quanto gliene dà”

!!!!!!

Huygens:

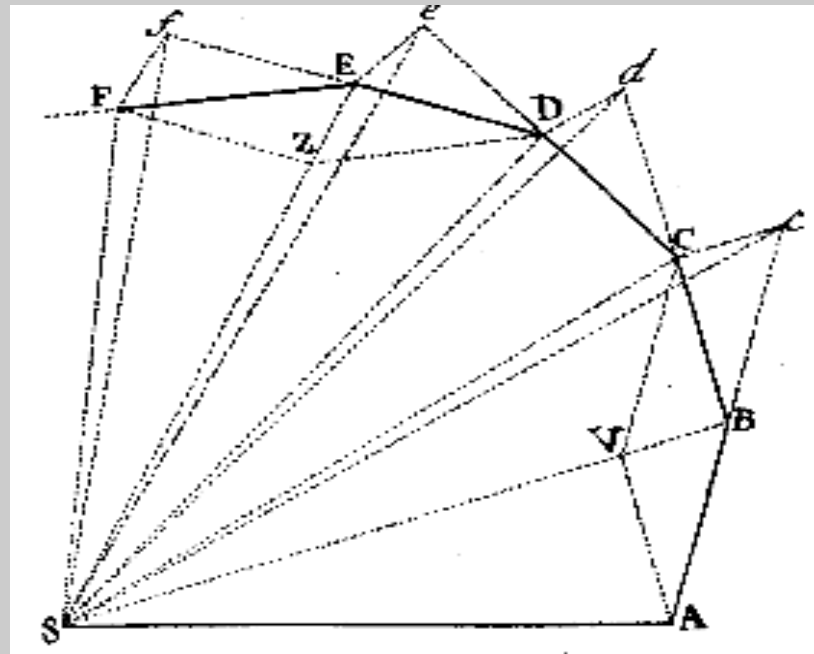
“Un corpo di piccolissima mole può spostare con l’urto un corpo grandissimo”

idea espressa attraverso un’immagine efficace: un uomo che con un colpo di martello sposta il globo terrestre!

Ripensare a Galileo: esperimento mentale

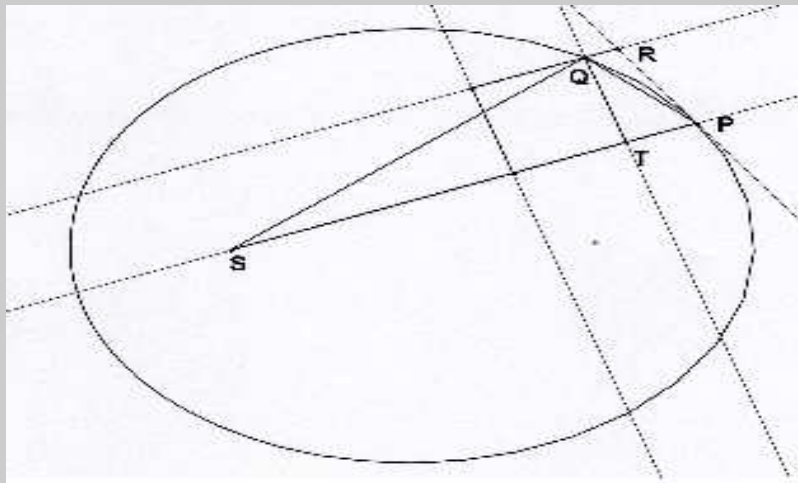
Dalle leggi del moto dei pianeti alla legge della gravitazione universale

Se un corpo si muove sotto l'azione di una forza centrale segue la legge delle aree



Quello di cui non era stato capace Hooke ...

*Se un corpo si muove su un'orbita ellittica allora la forza che lo attira è inversamente proporzionale al quadrato della distanza
(prima e seconda legge del moto, composizione dei movimenti, legge del moto uniformemente accelerato, legge delle aree)*

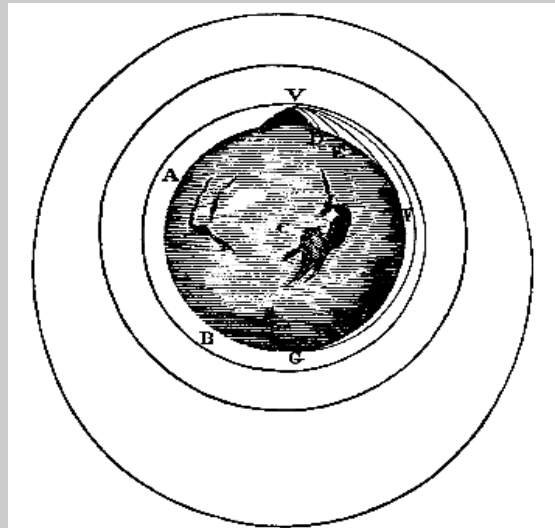


Presi un punto P e un punto Q sull'orbita ellittica, si tratta di vedere che il rapporto tra il segmento QR e il quadrato costruito sul segmento QT tende a un valore costante quando si prende il punto Q molto vicino al punto P. Gli studenti facevano muovere Q avvicinandolo a P e potevano verificare che detto rapporto rimaneva costante
[N. Guicciardini, I grandi della Scienza, Newton]

Confronto tra
accelerazione di caduta sulla Terra e accelerazione della Luna:

La distanza Terra-Luna è 60 volte il raggio terrestre; perciò se la Luna “cade” di una quota h in un minuto, un oggetto sulla Terra deve cadere della stessa quota in un secondo, dato che la forza esercitata dalla Terra varia con l'inverso del quadrato della distanza.

I dati sull'accelerazione di caduta degli oggetti sulla Terra e quelli orbitali della Luna confermano l'ipotesi di Newton



*Terza legge del moto ed espressione della
legge di gravitazione universale*

*“I satelliti di Giove seguono la
legge dei periodi? Saturno ha più
di un satellite? ... Intendo
determinare il moto delle comete
del 1664 e del 1680 secondo i
principi del moto dei pianeti”*

*“Le vostre informazioni mi
riempiono di soddisfazione”*

Newton a Flamsteed,
Osservatorio di Greenwich

$$F \propto \frac{M_1 M_2}{d^2}$$

I successi della teoria della gravitazione universale

- spiegazione dei fenomeni di marea
- moto delle comete
- scoperta del pianeta Nettuno
- interpretazione della variazione di g con la latitudine

La spiegazione del sistema del mondo si basa sulle tre leggi del moto formulate da Newton.

I successi della teoria della gravitazione universale rappresentano una conferma formidabile, non solo della legge di gravitazione universale, ma anche delle tre leggi del moto

Sulla scoperta di Nettuno

"Sarei lieto di trovare un tenace osservatore che volesse dedicare un po' del suo tempo ad esaminare una parte del cielo in cui può trovarsi un pianeta da scoprire. Sono stato portato a questa conclusione dalla teoria di Urano. Un sommario delle mie ricerche sta per essere pubblicato su Astronomische Nachrichten. Vedrete, Signore, che dimostro che è impossibile dar conto delle osservazioni di Urano senza introdurre l'azione di un nuovo pianeta finora sconosciuto; e, straordinariamente, che c'è una sola posizione nell'eclittica in cui il pianeta può essere localizzato [...] La posizione attuale di questo corpo mostra che adesso siamo, e lo saremo per alcuni mesi, in una condizione favorevole per poter fare la scoperta. Inoltre la massa del pianeta ci permette di concludere che il suo diametro è superiore a 3" d'arco. Questo disco è perfettamente distinguibile, con un buon telescopio, dai diametri stellari spuri causati dalle aberrazioni."

Lettera di Le Verrier all'astronomo Galle il 18 settembre 1846 [Grosser 1986]

Come facciamo a sapere che?

esperimento di Cavendish e determinazione
delle masse degli oggetti celesti

