

REGIONE
TOSCANA



Esperienze sensate e *sensate esperienze*

I fondamenti della cinematica e della dinamica seguendo le orme di Galileo

Grado scolastico: secondaria di secondo grado

Aree disciplinari: fisica e matematica

*di Antonio Mercogliano
ISIS Gramsci-Keynes, Prato*

Realizzato con il contributo della Regione Toscana nell'ambito del progetto

Rete Scuole LSS a.s. 2020/2021

Motivazione del percorso

- Crediamo che una didattica della scienza sia assolutamente vuota se non inserita in una adeguata narrazione.
- Una narrazione indispensabile affinché lo studente prenda coscienza di quello che sta imparando.
- Abbiamo sfruttato la didattica a distanza per mettere lo studente a capo del proprio laboratorio casalingo. Le indicazioni di volta in volta sono state molto scarse. L'analisi degli errori commessi nell'esecuzione delle esperienze sono stati parte integrante di una costruzione dei concetti per approssimazioni successive.
- Si è lasciato tempo agli studenti di fare pratica con la propria manualità e con l'uso di una semplice App di video tracking da installare sul proprio smartphone.
- La parte sperimentale è stata accompagnata dalla lettura di testi che aiutassero a comprendere perché si allestissero tali esperienze: quali le ipotesi, quale l'obiettivo che ci si prefigge, insomma le *sensate esperienze e certe dimostrazioni* care a Galileo.

Collocazione nel curriculum verticale

- Il percorso è stato progettato e sviluppato collocandolo nella prima parte del terzo anno di una classe Liceo Scientifico con Opzione Scienze Applicate.
- In realtà il percorso si collocherebbe meglio a cavallo tra il secondo e il terzo anno ma la classe in cui è stata fatta la sperimentazione non aveva ancora trattato approfonditamente la cinematica: gli studenti avevano affrontato soltanto i concetti di velocità media, accelerazione media e di moto rettilineo uniforme e uniformemente accelerato.
- Infatti la scansione degli argomenti che si è scelto di trattare nel primo biennio nel nostro istituto è la seguente:
 - metrologia, statica del punto materiale e statica dei fluidi durante il primo anno,
 - calorimetria, ottica, cinematica e dinamica in una dimensione durante il secondo.

Obiettivi del percorso didattico

- Ci si propone di approfondire dal punto di vista storico e concettuale i passaggi che hanno portato alla comprensione della natura del moto.
- Si vuole creare un racconto che fornisca agli studenti il paesaggio in cui collocare i problemi forniti dai libri di testo: sappiamo bene che insegnare a risolvere un esercizio sul moto di una particella senza inserirlo in un contesto, sia esso storico o tecnologico, non produce conoscenza né aiuta a sviluppare competenze.
- Ci si propone di affinare negli studenti la capacità di distinguere tra osservazione e deduzione. Come scrive Arons:
“molti studenti sono estremamente deboli in questa capacità di distinguere. Se non vengono aiutati da una serie di domande, essi non chiedono quali erano, da un canto, i fatti sperimentali e le prove, e quali erano invece, dall’altro, le inferenze dedotte dai fatti. Eppure questa capacità di distinzione è alla base, insieme ad altri processi, del comportamento intellettuale che potrebbe essere caratterizzato come pensiero critico”.

Elementi salienti dell'approccio metodologico

- A partire da esperienze domestiche e dalla lettura di brevi brani estratti dalle opere di Galileo si ripercorre, tappa dopo tappa, il programma di ricerca di galileiano.
- Ad ogni tappa ci si interroga su quali interpretazioni dare alle osservazioni sperimentali e si leggono brevi brani che aiutano a capire quali fossero i problemi incontrati, quali le ipotesi fatte.
- Si costruisce così un clima di confronto che, non trascurando le nozioni intuitive già in possesso degli studenti, ne fa emergere anche ambiguità o contraddizioni, conducendo alla definizione rigorosa dei concetti come punto di arrivo del processo di scoperta.
- Un metodo siffatto, basato sull'apporto personale dell'alunno e sul costante monitoraggio delle conoscenze apprese, è orientato alla costruzione di competenze solide e durature e, pertanto, facilita tale costruzione per gli alunni con Bisogni Educativi Speciali o non italofoni (presenti in numero cospicuo nella classe).

Materiali, strumenti e apparecchi utilizzati

- ◉ Strumentazione autoprodotta con materiale reperibile in casa
- ◉ Smartphone per le riprese video
- ◉ Software di geometria dinamica (GeoGebra)
- ◉ Software di simulazione astronomica (NAAP Labs)
- ◉ App di videotracking (VidAnalysis Free)
- ◉ Schede di lavoro con utilizzo di Google Moduli, dispense autoprodotte e appunti delle lezioni creati con Jamboard
- ◉ Dispositivo di lancio per moto parabolico
- ◉ Tubo di Newton
- ◉ Pendolo, magneti ad U

Ambienti in cui si è sviluppato il percorso

- ◉ Casa
- ◉ Scuola, Aula e Laboratorio di fisica
- ◉ Aula virtuale (In DAD usando Google Classroom e Meet)

Tempo impiegato

- Messa a punto preliminare nel gruppo LSS: 5 ore.
- Progettazione specifica: 30 ore (verifica dei materiali e degli strumenti; realizzazione preliminare delle esperienze di laboratorio e ricerca e selezione dei testi da leggere e commentare; redazione delle dispense, delle schede di laboratorio e di lavoro; definizione del percorso).
- Periodo: settembre/febbraio.
- Tempo-scuola di sviluppo del percorso: 50 ore.
- Documentazione del percorso: 30 ore.

Descrizione del percorso didattico

Il percorso è cominciato con la somministrazione di un questionario relativo alla conoscenza di alcuni fatti relativi all'astronomia. La discussione con gli studenti delle risposte date serve a prendere coscienza del fatto che la teoria eliocentrica non è scontata ed anzi pone più problemi di quella geocentrica. Da qui siamo partiti ad esaminare i tre grandi argomenti su cui si articola il programma di ricerca di Galileo, argomenti fortemente sovrapposti:

1. La caduta dei gravi
2. Il principio di inerzia
3. Il principio di relatività

Ciò è avvenuto attraverso una serie di esperienze fatte a casa dagli studenti che hanno preso via via coscienza della bontà e, perché no, delle difficoltà e dei limiti del metodo sperimentale.

Importante è stata la fase di verbalizzazione di ciò che si andava a fare. La DAD, che ha quasi imposto l'uso dei moduli di Google piuttosto che il canonico quaderno, si è rivelata in tal senso una straordinaria opportunità per fare acquisire agli studenti un linguaggio più chiaro e preciso.

Cosa fanno i nostri studenti di astronomia?

A cosa corrisponde dal punto di vista astronomico un anno, un mese, una settimana, un giorno?

Un anno corrisponde a 364 ^{completi} giri della Terra intorno alla Luna.

- Sorvolando su una affermazione come quella in figura, che può apparire incredibile se fatta da uno studente di terza liceo, i nostri alunni fanno poco e quel poco è una specie di dogma: il nostro eliocentrismo non è in fondo diverso dal geocentrismo tolemaico e forse con qualche giustificazione in meno.
- Il primo passo da compiere con gli studenti è proprio quello di imparare a ragionare. Esempio la risposta di A. alla domanda “Quali fatti ci possono far supporre che il Sole ruoti attorno alla Terra?”. A. risponde: “**è la Terra che ruota attorno al Sole**”. Insomma più aristotelico di Aristotele! Così come B. che scrive “**il Sole è al centro del sistema solare**”. S. è ancora più lapidario e sentenzia “**Nessuno**”!
- M. si fida invece ciecamente della tecnologia e scrive: “**perché abbiamo strumenti abbastanza potenti da farcelo sapere.**”

Il questionario

Queste le domande assegnate agli studenti mediante un modulo di Google. L'insegnante ha raccolto le risposte degli studenti dopodiché è seguita la discussione collettiva che si è sviluppata per le quattro lezioni successive.

1. Possiamo misurare il tempo basandoci sulla posizione del Sole? Se sì, in che modo?
2. A cosa corrispondono dal punto di vista astronomico un anno, un mese, una settimana, un giorno?
3. Cosa si intende per solstizio e per equinozio?
4. Quali differenze ci sono tra stelle e pianeti?
5. È possibile vedere pianeti ad occhio nudo? Se sì, quali?
6. Quali indicazioni possono darci le stelle?
7. Quali fatti ci possono far supporre che la Terra ruoti attorno al Sole?
8. Quali fatti ci possono far supporre che il Sole ruoti attorno alla Terra?
9. Come credi sia stato calcolato il raggio della Terra?
10. Come credi sia stato calcolato la distanza tra la Terra e il Sole?
11. Come credi sia stato calcolato la distanza tra la Terra e la Luna?
12. Come credi sia stato calcolato la massa della Terra?
13. Che cos'è un'eclissi? Quando si verifica?
14. Come è possibile orientarsi in assenza di una bussola?
15. Cosa si intende per latitudine e per longitudine?
16. È più facile stabilire la latitudine o la longitudine?

Il problema di chi cerca la risposta giusta

Come già sperimentato in altri percorsi molti studenti cercano di dare la risposta giusta. È sempre un'impresa convincerli a scrivere semplicemente ciò che pensano e non ciò che risponderebbe l'insegnante. Si è cercato di metterli a loro agio con questo epic fail tratto dalla versione francese di *Chi vuole essere milionario* e il cui link introduceva il questionario.



Il concorrente chiede l'aiuto del pubblico, pubblico che non lo aiuta: il 56% reputa esatta la risposta B ovvero che il Sole gravita attorno alla Terra!

Considerazioni generali

- Manca la consapevolezza, in almeno un terzo degli studenti intervistati, di come il Sole e le stelle siano stati nei secoli, per l'uomo, orologio e bussola.
- Alla domanda se sono visibili pianeti ad occhio nudo, quasi la metà non sa rispondere, qualcuno non crede sia possibile, gli altri indovinano uno o più pianeti.
- Quasi tutti credono che le distanze astronomiche siano state misurate in epoca recente usando sonde o satelliti (c'è chi cita lo specchio sulla Luna).
- Altri propongono misure effettuate in maniera molto ingenua: ad esempio F. scrive che il raggio della Terra si misura dividendo la circonferenza per 2π ; D. addirittura crede sia stata misurata la distanza tra il centro e la superficie della Terra tramite trivellazione.
- L. come spesso purtroppo accade ai ragazzi più diligenti ma poco strutturati cerca appiglio nelle formule e scrive che *"la massa della terra sarà uguale il raggio della terra alla seconda fratto all'accelerazione di gravità"*.
- Un quarto degli alunni ricordava qualcosa della misura di Eratostene ma in maniera vaga: c'è chi ha risposto semplicemente *'si usa l'ombra di un bastoncino'* oppure *'si calcola conoscendo la distanza tra due città a una certa ora'*.
- Abbiamo dedicato un paio di lezioni per vedere come Eratostene e Aristarco avessero brillantemente eseguito le loro misurazioni. In particolare il raggio della Terra e la distanza Terra-Luna saranno utili per giustificare l'inversa proporzionalità quadratica tra forza gravitazionale e distanza dal centro nell'analogia di Newton tra la caduta della mela e quella della Luna.
- Per tutti la differenza tra stelle e pianeti è legata al brillare o meno di luce propria oppure alla diversa composizione chimica. C'è chi parla di fusione nucleare nelle stelle ma nessuno studente, come prevedibile, li associa al loro moto. Nessuno sa che la parola pianeta vuol dire errante ed è legato alla traiettoria irregolare sulla volta celeste.

Le traiettorie delle stelle

Le stelle sono fisse oppure no? Gli studenti hanno dubbi al riguardo, qualcuno sa che la stella polare è fissa. E le altre in che modo si muovono?

Il docente propone la ricerca di uno dei tanti video presenti in rete digitando *star trails* o *rotating sky*.

O anche immagini ottenute fotografando il cielo con lunghe esposizioni delle fotocamere.

Queste immagini sono anche un ottimo pretesto per chiarire bene cosa si intenda in fisica per traiettoria.

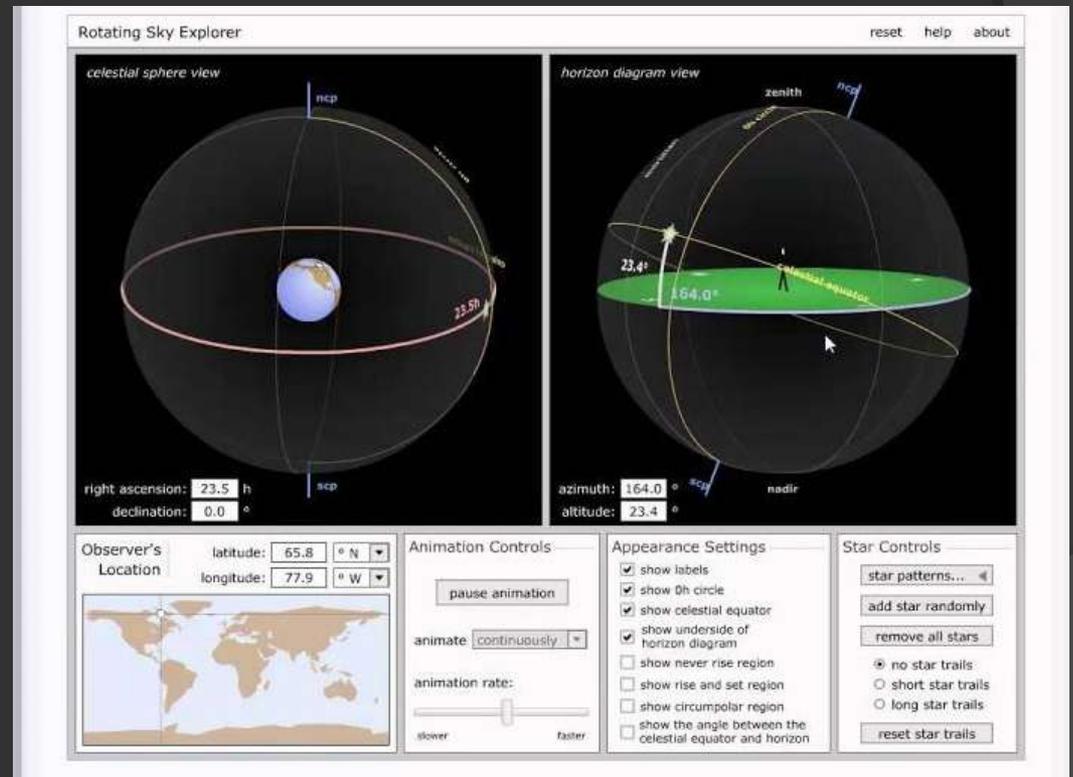
A questo punto si è dedicato un paio di lezioni all'approfondimento, dal solo punto di vista della cinematica, del moto circolare uniforme.



Il cielo rotante

Il sito della Università del Nebraska offre un ottimo pacchetto di simulatori. In particolare, *The rotating sky* propone, tra le varie opzioni, di visualizzare le scie di alcune stelle.

Si può anche scegliere un certo giorno dell'anno e un determinato punto geografico e seguirne i moti stellari.

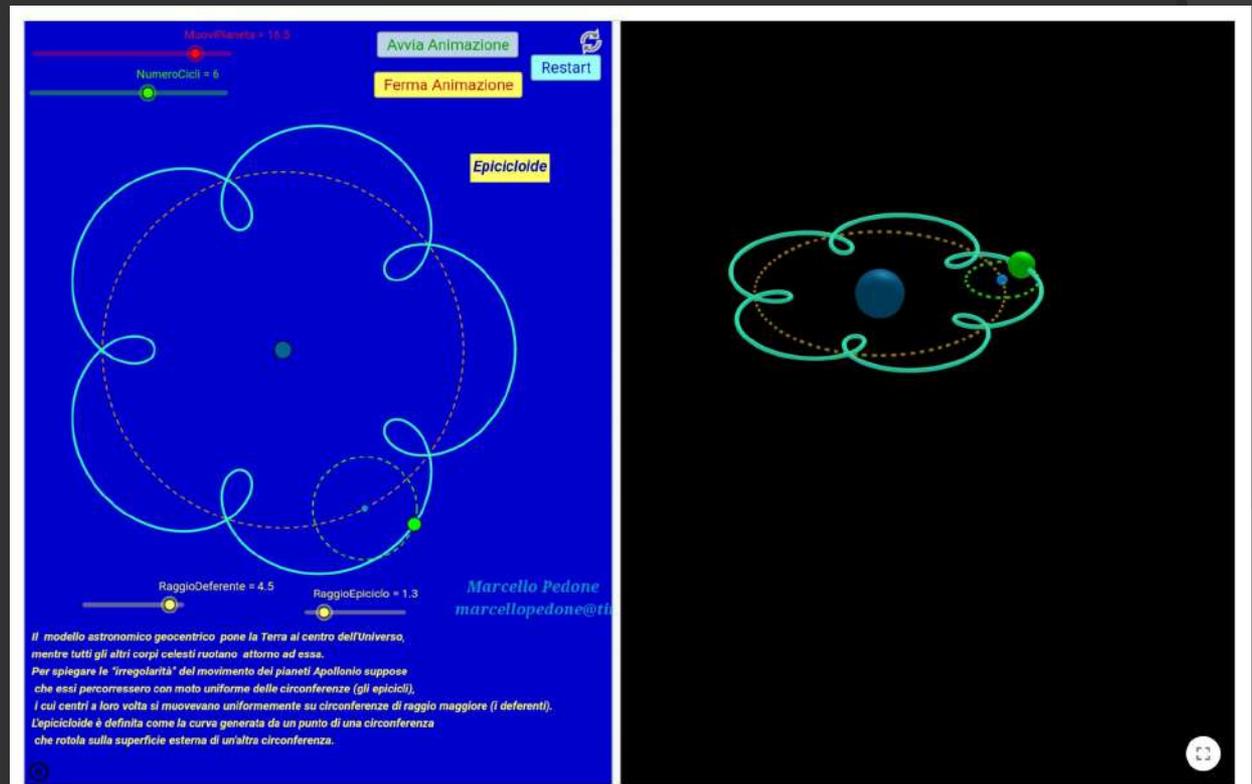


URL per il download: <https://astro.unl.edu/downloads/>

Stelle e pianeti: gli erranti del cielo

Pianeta significa errante. Le traiettorie dei pianeti sfuggivano al semplice moto circolare: perché seguivano traiettorie così strane? Le abbiamo esaminate con l'ausilio di GeoGebra, in rete sono presenti molte animazioni dei moti planetari in un sistema geocentrico.

Il docente ha infine spiegato che il sistema eliocentrico, che sarà proposto da Niccolò Copernico, superava questa anomalia del moto retrogrado dei pianeti ma poneva nuove questioni.



Quali fatti ci dicono che la Terra si muove?

A questa domanda un terzo circa degli studenti non ha risposto mentre gli altri hanno quasi tutti tirato in ballo il susseguirsi delle stagioni. Riportiamo qui alcune delle risposte più singolari che sono state poi oggetto di discussione collettiva.

- ◉ F. ha scritto **“Il fatto che il sole durante la giornata cambia di posizione e che sulla terra avvengono i terremoti.”**
- ◉ Singolare la risposta di V. **“se lasciamo cadere un oggetto da molto in alto esso non cadrà mai dritto dimostra che la Terra ruota su se stessa ma intorno al Sole non saprei”**
- ◉ G. confonde un esperimento forse mai fatto da Galileo e quello, documentato, di Guglielmini a Bologna: **“l’alternarsi del giorno e della notte e anche l’esperimento fatto alla torre degli Asinelli a Pisa.”**
- ◉ Nonostante che l’alternarsi di giorno e notte e delle stagioni possa essere preso a prova del moto del Sole invece che della Terra, molti come lo stesso G. scrivono che non hanno idea di quali siano i fatti a favore del moto del Sole. Non è un caso isolato, parlando con gli studenti, il docente ha appurato che quasi tutti coloro che non hanno risposto alla domanda erano convinti che fosse sbagliata. M. scrive: **“i fatti che ci potrebbero dire che il Sole ruota attorno alla Terra non sono provabili scientificamente, erano prove basate su fatti non dimostrabili legati alla religione”**

Quali erano le obiezioni contro il moto della Terra?

- Dopo aver discusso con gli studenti e fatto capire loro che in realtà un sistema eliocentrico è meno intuitivo di un sistema geocentrico il docente fa notare come, se si ammettesse un sistema con al centro il Sole, bisognerebbe necessariamente accettare anche il moto della Terra su se stessa per spiegare la rapida alternanza del giorno con la notte.
- Si legge in proposito questo breve estratto dal *Dialogo sopra i due massimi sistemi* di Galileo.

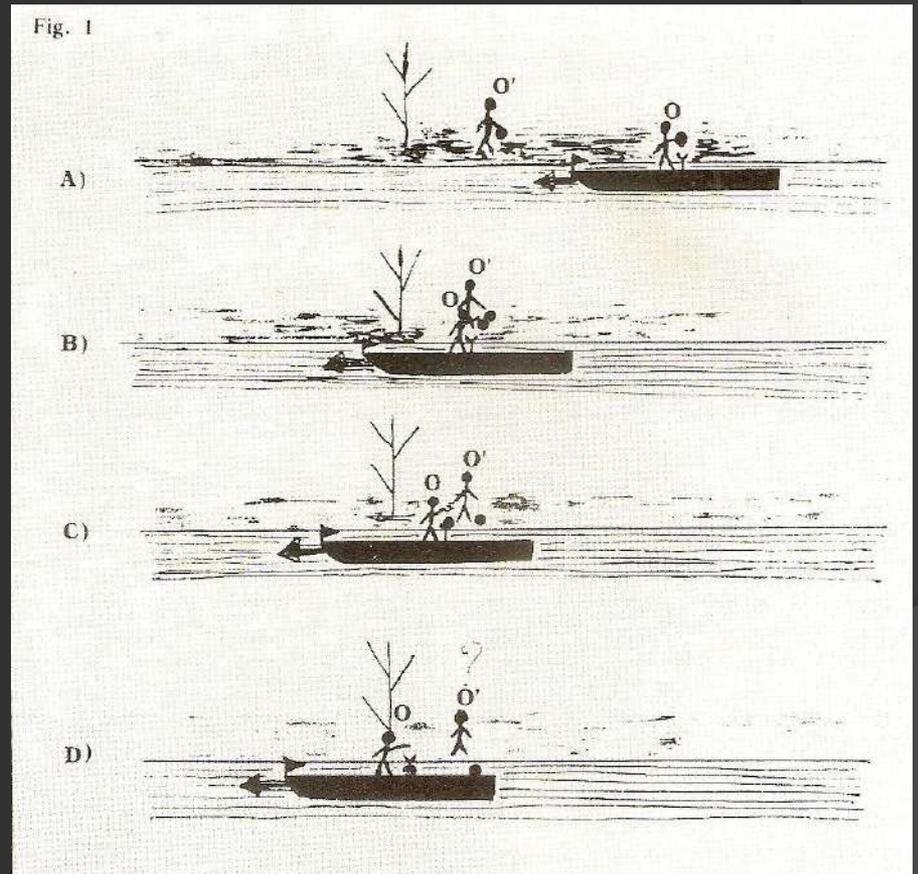
“e quando ciò sia [ammesso cioè il moto della Terra attorno al Sole], segue per necessaria conseguenza che anco il moto diurno sia della Terra: imperocché se, stando fermo il Sole, la Terra non si rivolgesse in se stessa, ma solo avesse il movimento annuo intorno al Sole, il nostro anno non sarebbe altro che un giorno e una notte, cioè sei mesi di giorno e sei mesi di notte.”

- Il docente spiega che le principali obiezioni portate avanti dai sostenitori della teoria geocentrica erano due:
 - (1) L'impossibilità da parte delle nubi, dei venti, degli uccelli di “tenere dietro” al moto della terra
 - (2) Gli eventuali effetti della rotazione terrestre sul moto di caduta dei gravi e sul moto dei proiettili in generale. In particolare un corpo lasciato cadere da una torre non dovrebbe cadere in verticale ma *rimanere indietro* lungo la direzione opposta a quella della Terra.
- Per quanto riguarda il primo punto si calcolano le velocità di rotazione della Terra attorno al Sole e su se stessa e si confrontano con le velocità dei più veloci mezzi di locomozione di cui disponiamo.

L'esperimento di Giordano Bruno

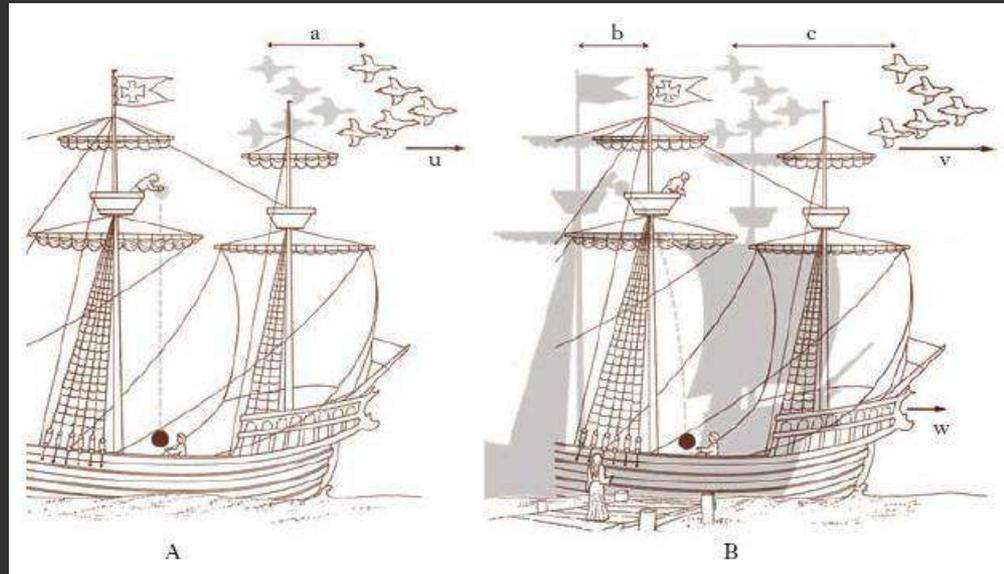
Il docente legge con la classe il seguente passo di Giordano Bruno da *La cena de le Ceneri*, un vero e proprio *esperimento pensato* che anticipa il più celebre discorso del *Gran Navilio* di Galileo:

Da quel, che rispondete a l'argomento tolto da venti e nuvole, si prende ancora la risposta de l'altro che nel secondo libro del cielo e mondo apportò Aristotele, dove dice, che sarebbe impossibile, che una pietra gittata a l'alto potesse per medesima retitudine perpendicolare tornare al basso; ma sarebbe necessario, che il velocissimo moto de la terra se la lasciasse molto a dietro verso l'occidente. Perchè essendo questa proiezione dentro la terra, è necessario, che col moto di quella si venga a mutar ogni relazione di retitudine ed obblività: perchè è differenza tra il moto de la nave, e moto di quelle cose, che sono nella nave: il che se non fusse vero, seguitarebbe, che, quando la nave corre per il mare, giammai alcuno potrebbe trarre per dritto qualche cosa da un canto di quella a l'altro, e non sarebbe possibile, che un potesse far un salto, o ritornare co' piè, onde li tolse. Con la terra dunque si muovono tutte le cose, che si trovano in terra. Se dunque dal loco extra la terra qualche cosa fusse gittata in terra, per il moto di quella perderebbe la retitudine. Come appare ne la nave, la qual, passando per il fiume, se alcuno, che si ritrova ne la sponda di quello, venga a gittar per dritto un sasso, verrà fallito il suo tratto, per quanto comporta la velocità del corso.



La nave e la caduta dalla torre

All'obiezione della caduta dalla torre Bruno oppone l'esempio di un oggetto che cade dalla cima dell'albero di una nave (forse realmente eseguito in qualcuno dei suoi viaggi?)



“Ma posto alcuno sopra l’arbore di detta nave, che corra quanto si voglia veloce, non fallirà punto il suo tratto: di sorte che per dritto dal punto, ch’è ne la cima de l’arbore, o ne la gabbia al punto, ch’è ne la radice de l’arbore, o altra parte del ventre e corpo di detta nave, la pietra o altra cosa grave gittata non vegna. Così se dal punto de la radice al punto de la cima de l’arbore, o de la gabbia, alcuno ch’è dentro la nave, gitta per dritto una pietra, quella per la medesima linea ritornerà a basso, muovasi quanto si voglia la nave, pur che non faccia de gl’inchini”.

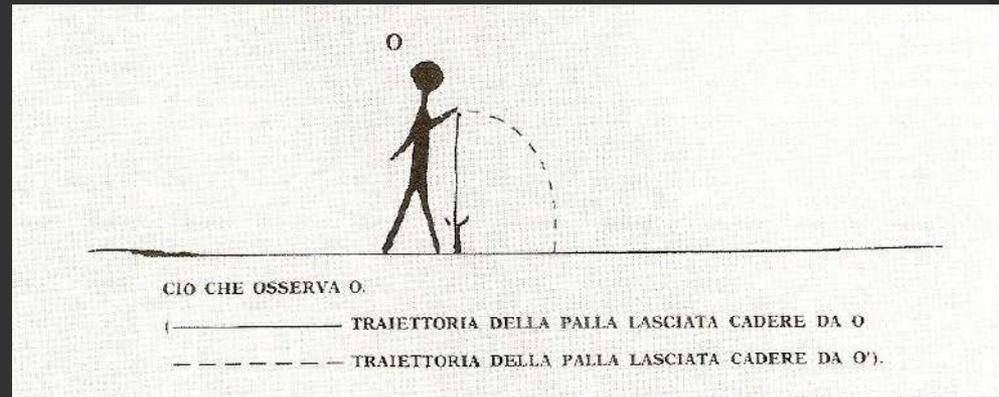
Per una migliore comprensione del testo è stato proposto alla classe il video del PSSC relativo ai sistemi di riferimento dove viene fatta cadere una sferetta su un carrellino in moto ripreso da una telecamera prima solidale al carrello e poi solidale alla rotaia.

Bruno e un'idea possibile

- Scrive ancora il filosofo nolano:

“Or per tornare al proposito, se dunque saranno dui, de' quali l'uno si trova dentro la nave, che corre, e l'altro fuori di quella, de'quali tanto - l'uno, quanto l'altro abbia la mano circa il medesimo punto de l'aria, e da quel medesimo loco nel medesimo tempo ancora l'uno lasci scorrere una pietra, e l'altro un' altra, senza che le donino spinta alcuna, quella del primo, senza perdere punto, nè deviar da la sua linea, verrà al prefisso loco; e quella del secondo si troverà tralasciata a dietro. Il che non procede da altro, eccetto che la pietra, ch'esce da la mano de l'uno, ch'è sustentato da la nave, e per conseguenza si muove secondo il moto di quella, ha tal virtù impressa, quale non ha l'altra, che procede dalla mano di quello, che n'è di fuori, ben che le pietre abbino medesima gravità, medesima aria tramezzante, si partano — possibil fia — dal medesimo punto, e patiscano la medesima spinta. De la qual diversità non possiamo apportar altra ragione, eccetto che le cose, che hanno fissione, o simili appartenenze ne la nave, si muovono con quella; e l'una pietra porta seco la virtù del motore, il quale si muove con la nave, l'altra di quello, che non ha detta partecipazione. Da questo manifestamente si vede, che non dal termine del moto, onde si parte, nè dal termine, dove va, nè dal mezzo, per cui si muove, prende la virtù d'andar rettamente, ma da l'efficacia de la virtù primieramente impressa, da la quale dipende la differenza tutta”

- La figura illustra l'esperimento e diventa ulteriore occasione di parlare di sistemi di riferimento e relatività.



- Ad alcuni studenti è venuto in mente di realizzare nel laboratorio di robotica del nostro istituto quest'ultimo esperimento narrato da Giordano Bruno. Avevano buttato giù delle idee ma non è stato possibile montare fisicamente i robot: le circostanze dovute alla pandemia ci hanno costretto a rimandare l'esperienza.

La caduta dei gravi

- Ci siamo, a questo punto, concentrati sull'analisi della caduta libera.
- Abbiamo proposto agli studenti di realizzare brevi video relativi alla caduta libera di:
 - A. 2 corpi di massa e forma diversa
 - B. 2 corpi di uguale massa e forma diversa (ad esempio 2 fogli di carta, uno appallottolato, l'altro no)
 - C. 2 corpi di uguale forma e massa diversa
 - D. 2 corpi prima separati e poi uniti (ad esempio uno dentro l'altro)
- Le considerazioni qualitative su quanto fatto sono state raccolte su Google Moduli. Due le domande: descrivere cosa avevano visto e dire se si aspettavano o meno tale risultato.
- Interessanti le risposte che andremo poi ad analizzare nel dettaglio.

Corpi di massa e forma qualsiasi

Sin dalla prima domanda (*Quali oggetti hai utilizzato? Cosa hai notato circa i tempi di caduta? Ti aspettavi tale risultato? Perché?*) emergono risultati contrastanti tra chi era convinto che sarebbe arrivato a terra l'oggetto più pesante e vede confermata l'ipotesi e chi invece deve ricredersi e argomenta in maniera più o meno articolata l'esito dell'esperienza.

Portafoglio e custodia per gli occhiali. Cadono nella terra circa nello stesso tempo. Non mi aspettavo questo risultato perchè pensavo fosse quello che ha massa più grande cadesse per prima nella terra.

Ho usato un astuccio pieno ed un foglio. Ho notato che l'astuccio cade più in fretta rispetto al foglio. Mi aspettavo questo risultato perché l'astuccio è più pesante del foglio.

Per questo esperimento ho utilizzato una gomma ed una pallina da tennis, ed ho notato che la pallina da tennis ha una caduta che impiega un lasso di tempo minore rispetto a quella della gomma (rispettivamente 0,50s e 0,67s). mi aspettavo questo risultato in quanto la gomma è sì più piccola della pallina da tennis, ma basta prenderla in mano per rendersi conto del fatto che la gomma sia più pesante, ed inoltre essendo piccola concentra tutta la sua 'pesantezza' in un punto solo.

Ho usato una calcolatrice e degli occhiali da sole. Sono caduti molto velocemente circa in 1s. Si mi aspettavo che cadesse prima la calcolatrice perché è più pesante e ha massa maggiore rispetto a gli occhiali.

Un metro ed una gomma. In circa mezzo secondo hanno toccato terra, insieme. Mi aspettavo questo risultato dati gli oggetti diversi ma simili e di simili dimensioni.

Ho utilizzato le carte poker e una bottiglia vuota. Sono caduti nello stesso tempo. Non mi aspettavo questo risultato perché credevo che le carte, che sono più pesanti, cadevano più veloce.

Ho utilizzato una moneta e una pallina di carta piccola. che la monetina è caduta prima della pallina di carta.si.perchè la monetina ha una massa maggiore.

Per fare questo esperimento ho utilizzato una gomma da cancellare e un evidenziatore, durante l'esperimento ho notato che i due oggetti scelti cadono e toccano terra nello stesso momento. Sinceramente non mi aspettavo tale risultato perché pensavo che l'oggetto con massa maggiore arrivasse per primo a toccare terra rispetto l'oggetto con massa minore.

Per questo esperimento ho utilizzato una scatolina e un tubetto. Ho notato che entrambe gli oggetti avevano gli stessi tempi di caduta, non mi aspettavo questo risultato perchè pensavo che l'oggetto con massa maggiore, e quindi il tubetto, toccasse per primo il pavimento.

Ho utilizzato una scarpa e un cacciavite. Ho visto che il cacciavite è arrivato a terra prima della scarpa. Non mi aspettavo questo risultato perché pensavo che la scarpa pesando di più toccava per terra prima del cacciavite.

Quelli che parlano della gravità

Qualcuno, come era prevedibile, non guarda all'esperimento ma si aggrappa a qualche nozione acquisita in maniera vaga. C'è chi ha visto un video alle scuole medie, chi afferma che l'accelerazione sia 9,8. Ecco le loro risposte:

Ho utilizzato della carta stagnola accartocciata e una pallina di spugna, noto che i tempi di caduta sono gli stessi e mi aspettavo tale risultato perché tutti i corpi sono soggetti all'accelerazione di gravità e la massa e la forma non influiscono sulla caduta.

Ho utilizzato una matita e scatoletta di cartone, sono caduti insieme. perché l'accelerazione di gravità è uguale in tutti e due i corpi.

Ho utilizzato un astuccio vuoto e una gomma. Li ho lasciati cadere ad un'altezza uguale e sono atterrati tutti e due nello stesso attimo. Mi aspettavo questo risultato anche perché da come ha studiato Galileo Galilei, i corpi subiscono l'accelerazione di gravità che è per tutti uguale.

Ho utilizzato carta e Amuchina, i tempi di caduta sono quasi uguale 0.31s. Penso che loro hanno stessa accelerazione (9.8).

Ho usato una carta di poker e un foglio bianco, il risultato cadono quasi nello stesso momento (a causa di errore di parallasse), in realtà mi aspettava anche prima che devono cadere in stesso momento perché nella scuola media ho visto il video di Galileo Galilei, nel video ha fatto un esperimento simile.

Queste risposte, ma forse è superfluo sottolinearlo, sono sintomatiche di un'acquisizione trasmissiva del sapere che spesso non è sottoposto a critica.

Questione di forma e di mezzo

- C'è chi già parla di aerodinamicità e dell'effetto dell'aria, ma sono una minoranza della classe:

Ho utilizzato un contenitore e un foglio di carta. Ho notato che il contenitore ha toccato per primo il tavolo. Mi aspettavo questo risultato perchè il foglio ha una forma particolare e la sua accelerazione viene rallentata dalla forza dell'aria.

Ho utilizzato una gomma da cancellare e un foglio di carta, nei tempi di caduta ho notato che cade prima del foglio di carta, mi aspettavo questo risultato perchè il foglio ha una forma molto diversa dalla gomma con una superficie maggiore quindi l'aria che agisce sul foglio fa sì che arrivi a terra dopo.

Per il primo step ho usato una scatola da scarpe vuota e un rotolo di scottecs, ho notato che alla stessa altezza i due oggetti toccano il suolo nello stesso tempo. No, non mi aspettavo questo risultato pensavo che la scatola cadesse per ultima data la sua forma poco aerodinamica.

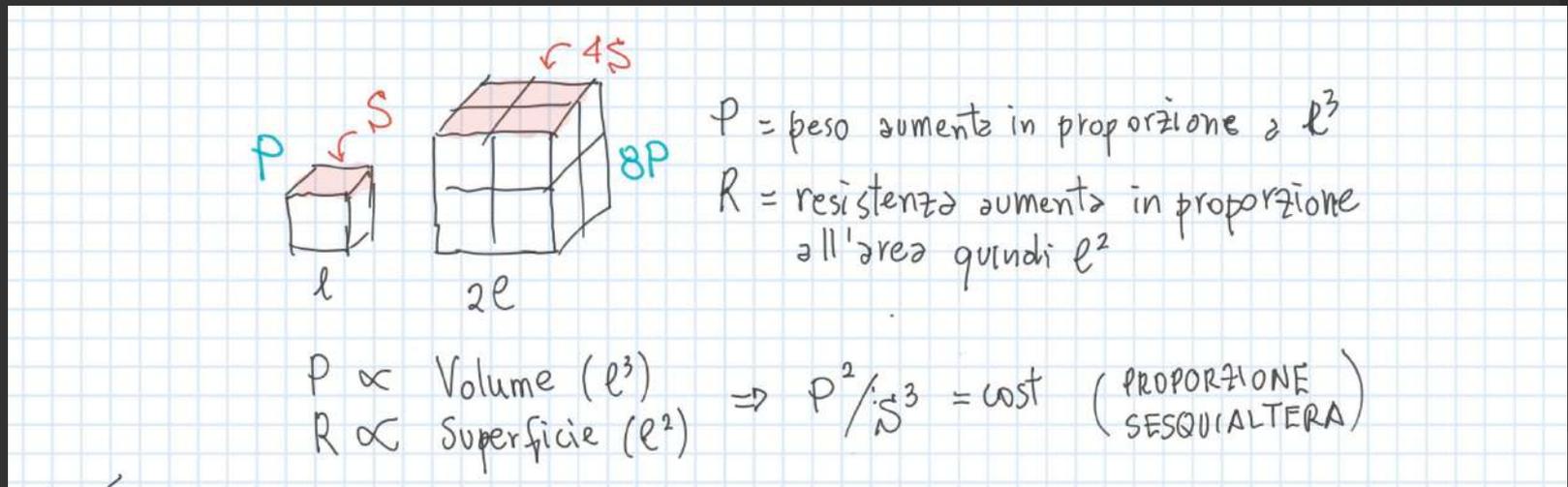
*Ho usato un cubo di Rubik ed una penna e ho notato che il **cubo di Rubik tocca il suolo un attimo prima della penna, ma non mi aspettavo tale risultato, pensavo ci sarebbe stato più distacco temporale essendo la penna molto leggera.***

- Quest'ultima risposta è la più interessante, il docente sottolinea come questo fatto sia portato da Galileo come prova per confutare l'idea aristotelica della velocità di caduta inversamente proporzionale alla densità del mezzo. Scrive infatti nei *Discorsi*:

“Aristotele dice: «una palla di ferro di cento libbre, cadendo dall'altezza di cento braccia, arriva in terra prima che una di una libbra sia scesa un sol braccio»; io dico ch'ell'arrivano nell'istesso tempo; voi trovate, nel farne l'esperienza, che la maggiore anticipa due dita la minore, cioè che quando la grande percuote in terra, l'altra ne è lontana due dita: ora vorreste dopo queste due dita appiattare le novantanove braccia di Aristotele, e parlando solo del mio minimo errore, metter sotto silenzio l'altro massimo. Aristotele pronunzia che mobili di diversa gravità nel medesimo mezzo si muovono (per quanto dipende dalla gravità) con velocità proporzionate a i pesi loro, e l'esemplifica con mobili ne i quali si possa scorgere il puro ed assoluto effetto del peso, lasciando l'altre considerazioni sì delle figure come de i minimi momenti, le quali cose grande alterazione ricevono dal mezzo, che altera il semplice effetto della sola gravità: che perciò si vede l'oro, gravissimo sopra tutte l'altre materie, ridotto in una sottilissima foglia andar vagando per aria; l'istesso fanno i sassi pestati in sottilissima polvere.”

La proporzione sesquialtera

- Nei *Discorsi* Galileo si sofferma quindi sulla resistenza offerta dal mezzo al moto dei corpi in caduta libera. Se facciamo cadere cubetti dello stesso materiale notiamo che all'aumentare dello spigolo L aumenta il peso P in proporzione al volume (quindi come L^3) mentre la pressione esercitata dal mezzo sulla superficie S del cubetto aumenta in proporzione quadratica (quindi come L^2): di conseguenza se raddoppio il lato di un cubo il volume diventa otto volte più grande mentre la resistenza del mezzo aumenta solo di quattro volte. È quella che Galileo chiama proporzione sesquialtera (ovvero il rapporto tra P^2 e S^3 è costante).



- Tornando all'esempio precedente se prendiamo un cubo di lato $L = 100$ e lo frantumiamo in un milione di cubetti di lato $L = 1$ ci ritroviamo in entrambi i casi con la stessa massa ma, se nel primo la superficie sarà pari a 10000, nel secondo varrà 1000000. Così, in quest'ultimo caso, la resistenza sarà 100 volte minore.

L'esperimento mentale di Galileo

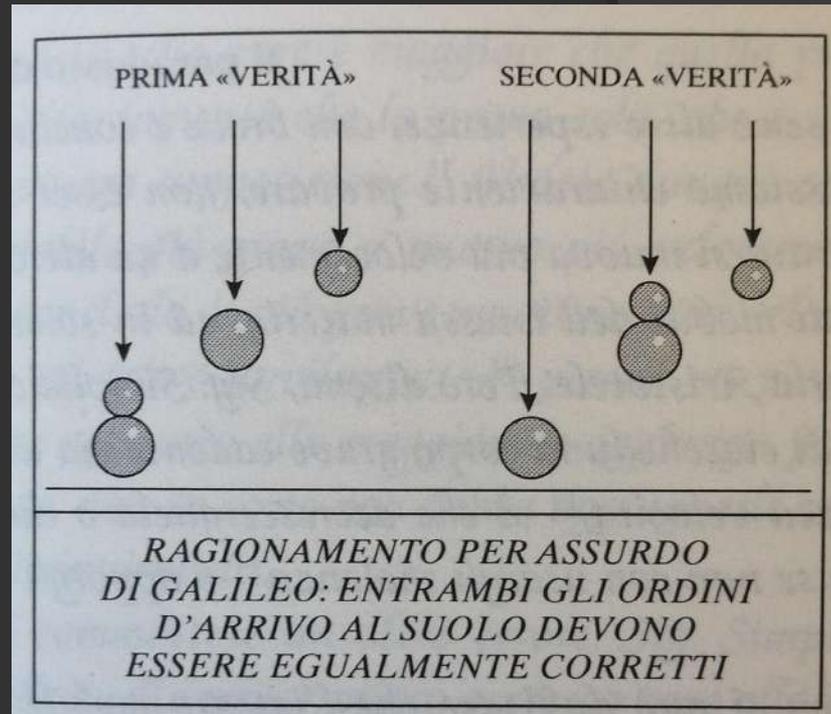
Relativamente all'ultimo punto, quello dei due corpi prima separati e poi uniti, viene letto in classe questo brano di Galileo, un esperimento mentale in cui si dimostra per assurdo la fallacia dell'idea aristotelica.

Salviati: Quando dunque noi avessimo due mobili, le naturali velocità de i quali fussero ineguali, è manifesto che se noi congiugnessimo il più tardo col più veloce, questo dal più tardo sarebbe in parte ritardato, ed il tardo in parte velocitato dall'altro più veloce. Non concorrete voi meco in quest'opinione?

Simplicio: Parmi che così debba indubitabilmente seguire.

Salviati: Ma se questo è, ed è insieme vero che una pietra grande si muova, per esempio, con otto gradi di velocità, ed una minore con quattro, adunque, congiugnendole amendue insieme, il composto di loro si moverà con velocità minore di otto gradi: ma le due pietre, congiunte insieme, fanno una pietra maggiore che quella prima, che si moveva con otto gradi di velocità: adunque questa maggiore si muove men velocemente che la minore; che è contro alla vostra supposizione. Vedete dunque come dal suppor che 'l mobile più grave si muova più velocemente del men grave, io vi concludo, il più grave muoversi men velocemente.

Simplicio: Io mi trovo avviluppato, perché mi par pure che la pietra minore aggiunta alla maggiore le aggiunga peso, e aggiugnendole peso, non so come non debba aggiugnerle velocità, o almeno non diminuirgliela.



La caduta verticale come caso limite

- Come rallentare la caduta di un corpo senza avere uno smartphone? Galileo non possedeva strumenti adatti per rivedere la caduta al *rallenti*.
- L'idea allora è quella di eseguire un esperimento che *rallenti* l'evento ovvero un piano inclinato. L'obiezione che qualcuno fa subito è: chi ci garantisce che quello che succede su un piano inclinato è lo stesso per un corpo in caduta libera? Molti intervengono obiettando che sul piano inclinato c'è più attrito che in aria.
- Il docente illustra il ragionamento di Galileo: se il moto su piani inclinati di varia pendenza è sempre dello stesso tipo allora anche la caduta libera, vista come la caduta lungo un piano inclinato di 90° seguirà le medesime leggi.
- C'è in nuce l'idea matematica di passaggio al limite: se vale per angoli prossimi a 90° varrà anche lungo un piano verticale.

Il piano inclinato

Lettura dai *Discorsi sopra due nuove scienze*:

In un regolo, o voglian dir corrente, di legno, lungo circa 12 braccia, e largo per un verso mezo braccio e per l' altro tre dita, si era in questa minor larghezza incavato un canaletto, poco più largo di un dito ; tiratolo dirittissimo, e, per haverlo ben pulito e liscio, incollatovi dentro una carta pecora zannata e lustrata al possibile, si faceva in esso scendere una palla di bronzo durissimo, ben rotonda e pulita ; costituito che si era il detto regolo pendente, elevando sopra il piano orizzontale una delle sue estremità un braccio o due ad arbitrio, si lasciava (come dico) scendere per il detto canale la palla, notando, nel modo che appresso dirò, il tempo che consumava nello scorrerlo tutto, replicando il medesimo atto molte volte per assicurarsi bene della quantità del tempo, nel quale non si trovava mai differenza né anco della decima parte di una battuta di polso. Fatta e stabilita precisamente tale operazione, facemmo scender la medesima palla solamente per la quarta parte della lunghezza di esso canale ; e misurato il tempo della sua scesa, si trovava sempre puntualissimamente esser la metà dell' altro : e facendo poi l' esperienze di altre parti, esaminando hora il tempo di tutta la lunghezza col tempo della metà, o con quello delli duo terzi, o de i $\frac{3}{4}$, o in conclusione con qualunque altra divisione, per esperienze ben cento volte replicate sempre s'incontrava, gli spazi passati esser tra di loro come i quadrati de i tempi, e questo in tutte le inclinazioni del piano [...]

Galileo compie i suoi esperimenti con piani in cui il rapporto tra l'altezza e la lunghezza varia tra $1/12$ e $1/6$ corrispondenti quindi a inclinazioni comprese tra i 5 e i 10 gradi.

Il piano inclinato

- ◉ Gli studenti si confrontano a casa con l'esperienza del piano inclinato: obiettivo, verificare la proporzionalità quadratica tra tempo e spazio percorso. Per fare questo si costruiscono il loro apparato casalingo. Il docente suggerisce due possibilità, usare un metro a nastro oppure un tubo di cartone tagliato longitudinalmente.
- ◉ Primo compito è quello di cronometrare manualmente i tempi di discesa lungo due tratti in rapporto di 1 a 4 e verificare che i tempi di percorrenza siano invece in rapporto di 1 a 2.
- ◉ In seconda battuta ci si è affidati a una App gratuita per Android, VidAnalysis Free per verificare in maniera più precisa quanto dedotto in precedenza.
- ◉ L'idea di Galileo è che, se il moto è, per qualsiasi valore della pendenza del piano, uniformemente accelerato, allora lo sarà anche per la caduta verticale. Si è tornati a ripetere l'esperienza della caduta libera e a verificare con la App di tracking che tale ipotesi è vera.
- ◉ L'ultimo passo è stato poi verificare in laboratorio, con l'ausilio del tubo di Newton, che una piuma e una sferetta di metallo, in assenza d'aria, cadono con identica accelerazione.

Facciamo il punto della situazione

- ◉ Prima di passare all'uso della app VidAnalysis Free viene chiesto agli studenti di rispondere a un breve questionario su Google Moduli:
 - Nell'esperimento fatto a casa quali problemi hai avuto?
 - In una eventuale ripetizione dell'esperimento quali modifiche attueresti per migliorare i risultati ottenuti?
- ◉ Grazie all'utilizzo dei moduli il docente ha potuto ogni volta organizzare le risposte e pianificare la discussione successiva con tutta la classe.
- ◉ Questo approccio è stato mantenuto anche per gli esperimenti successivi: ogni volta si è discusso e gli alunni hanno imparato a migliorare le proprie abilità sperimentali. one e velocità.
- ◉ Quasi tutti gli studenti scrivono che il maggiore problema incontrato è stata la misura dei tempi, c'è chi parla di utilizzare sensori o registrare il video dell'esperienza. Un paio di studenti hanno filmato il piano inclinato e il cronometro del tablet in modo da verificare, tramite il fermo immagine, il tempo esatto di passaggio della pallina.

Ma Galileo l'ha fatto davvero?

- Il docente racconta alla classe come, fino a qualche decennio fa, gli stessi storici della scienza erano scettici sul fatto che Galileo avesse veramente eseguito gli esperimenti descritti nelle sue opere e di come uno studioso americano, Thomas Settle, avesse provato, con successo, a ripetere l'esperienza del piano inclinato usando un orologio ad acqua costruito come descritto da Galileo, raggiungendo una buona precisione sperimentale.

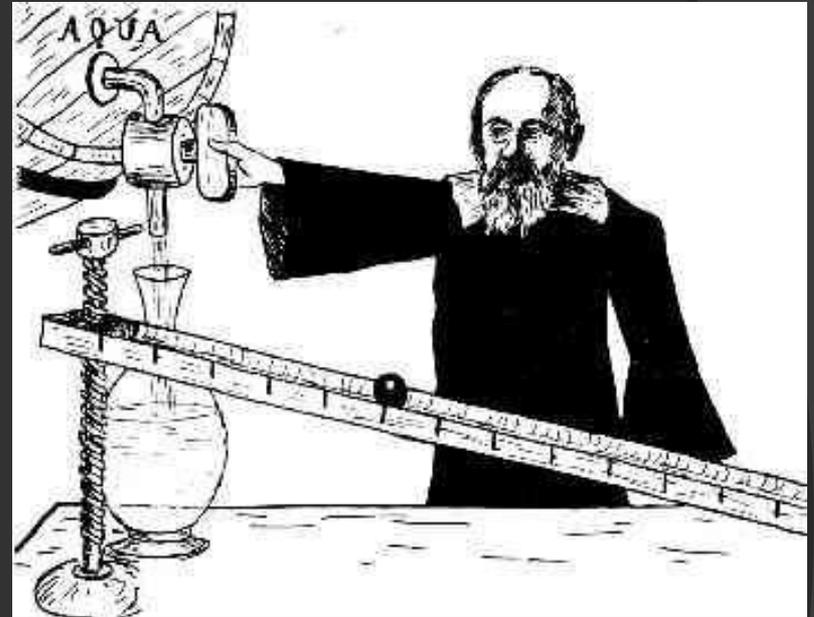


Immagine tratta da *Biografia della fisica* di George Gamow

- La costruzione di un orologio ad acqua è anche proposta come esperienza da realizzare con materiali poveri da Zanetti (vedi bibliografia) e potrebbe rientrare in un percorso di questo tipo. Noi, come vedremo, abbiamo posto la nostra attenzione sui pendoli.

Quanta precisione vogliamo?

- Qui, e nel seguito del percorso, si è dovuto fare una scelta sulla bontà delle nostre misure.
- Nonostante in prima liceo si cominci quasi sempre con il parlare di cifre significative e propagazione degli errori, la cura per questi aspetti della metrologia diventa spesso solo l'unità di misura della pignoleria del docente di turno.
- Si è scelto quindi di ricordare sempre le corrette tecniche e procedure sul trattamento delle misure ma di privilegiare un'analisi qualitativa del problema accontentandoci di poche misure quando i risultati apparivano chiari e plausibili.

ESPERIMENTO GALILEO

• 1° TRATTO DA 100 A 0 cm.
 $t = 3,20$ s
 $n = 3,42$ s $\rightarrow t_{\text{medio}} = 3,15$ s
 $n = 3,15$ s

• 2° TRATTO DA 100 A 50 cm (META)
 $t = 2,20$ s
 $n = 2,26$ s $\rightarrow t_{\text{medio}} = 2,23$ s
 $n = 2,23$ s

• 3° TRATTO DA 100 A 75 cm (3/4)
 $t = 1,50$ s
 $n = 1,53$ s $\rightarrow t_{\text{medio}} = 1,51$ s
 $n = 1,51$ s

• 4° TRATTO DA 100 A 25 cm (3/4)
 $t = 2,63$ s
 $n = 2,68$ s $\rightarrow t_{\text{medio}} = 2,64$ s
 $n = 2,64$ s

\Leftrightarrow PROPORZIONALITÀ QUADRATICA (cost) = $\frac{\text{SPAZIO PER CORSO}}{(\text{TEMPO IMPIEGATO})^2} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$

• $\text{cost}_1 = \frac{1 \text{ m}}{(3,15 \text{ s})^2} = 0,1 \text{ m/s}^2$

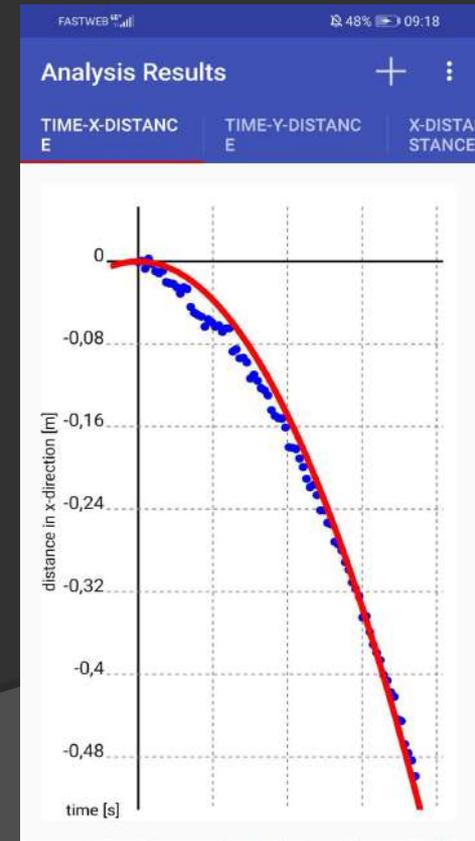
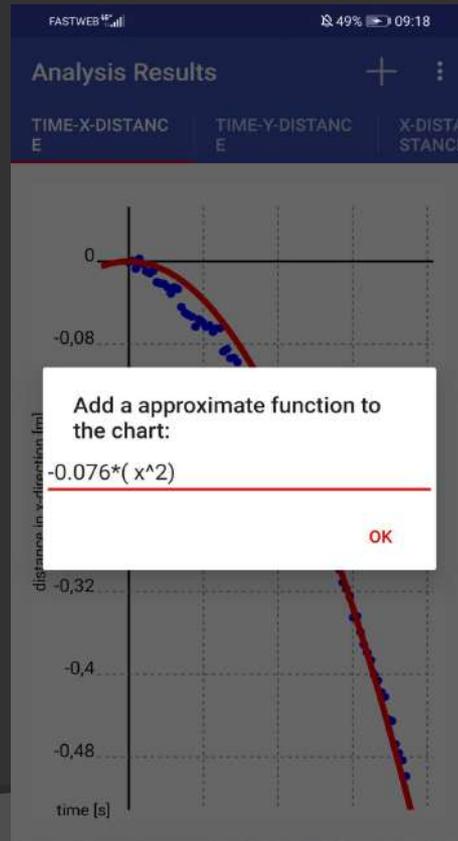
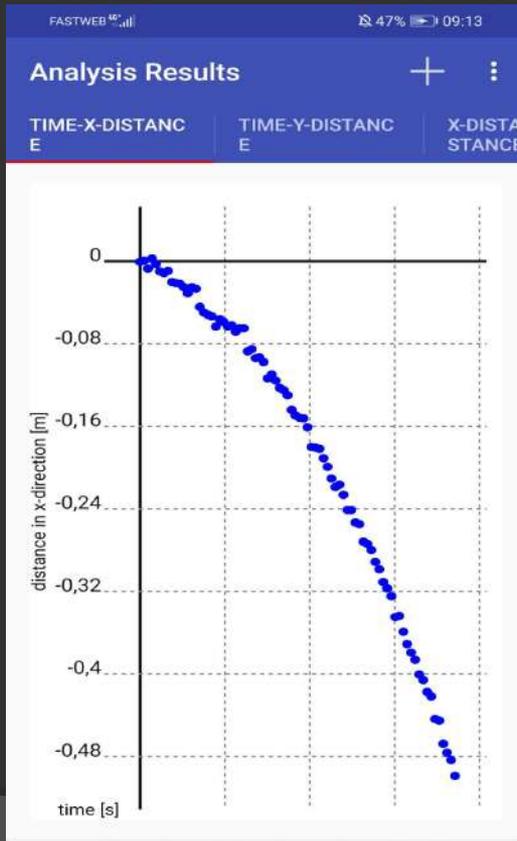
• $\text{cost}_2 = \frac{0,5 \text{ m}}{(2,23 \text{ s})^2} = 0,1 \text{ m/s}^2$

• $\text{cost}_3 = \frac{0,25 \text{ m}}{(1,51 \text{ s})^2} = 0,1 \text{ m/s}^2$

• $\text{cost}_4 = \frac{0,75 \text{ m}}{(2,64 \text{ s})^2} = 0,1 \text{ m/s}^2$

L'analisi con il video tracking

VidAnalysis Free consente di porre sullo schermo un sistema di assi cartesiani, decidere un'unità di lunghezza stabilendo la distanza di due punti sullo schermo, scorrere frame by frame il filmato e individuare il punto in movimento. Dopodiché è possibile ottenere il listato dei dati (posizioni x e y e tempo t), i grafici x-t, y-t, velocità-tempo e soprattutto è possibile sovrapporre al grafico una funzione continua che passa per i punti campione.



La scelta del sistema di riferimento

- Dover scegliere, quando si utilizza VidAnalysis Free, un sistema di assi cartesiani, impone una riflessione sul verso di percorrenza della sferetta lungo l'asse coordinato. Tale scelta determina il segno, positivo o negativo, di posizione e velocità.
- Diventa quindi ulteriore occasione per discutere con gli studenti della arbitrarietà della scelta del sistema di riferimento e del fatto che il segno che attribuiamo alle grandezze cinematiche sia assolutamente convenzionale.
- È opportuno spiegare che decelerare non vuole dire *tout court* accelerazione negativa.
- Si procede a qualche esempio numerico: se un corpo cade, il modulo della sua velocità aumenta indipendentemente dal SR scelto. Se consideriamo un sistema di riferimento che va dal basso verso l'alto, l'accelerazione è negativa, viceversa, se il sistema di riferimento punta verso il basso, l'accelerazione è positiva.

Da cosa dipende l'accelerazione?

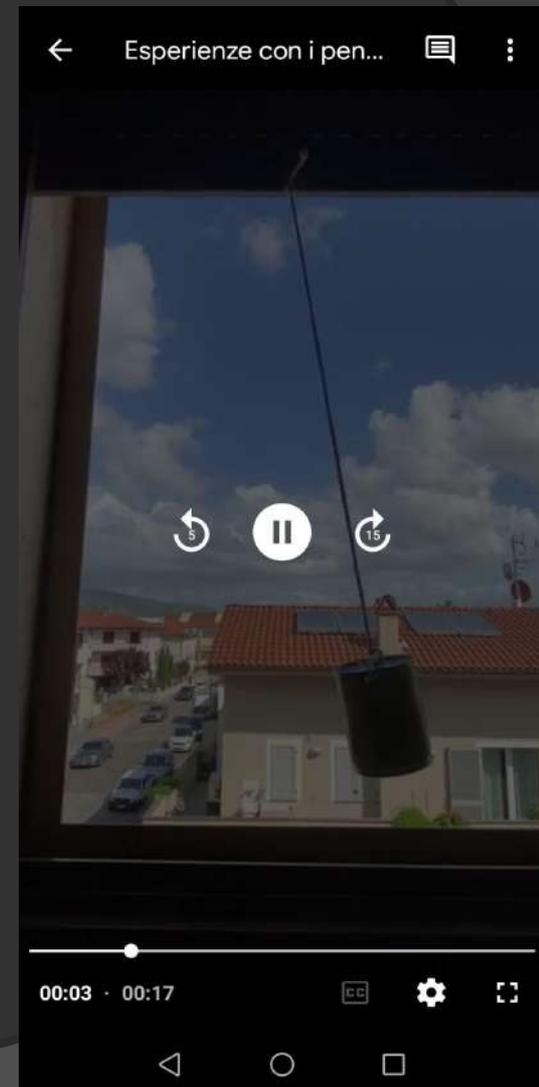
- Una volta stabilito che il moto lungo il piano inclinato è uniformemente accelerato si è cercato di capire come variasse il valore dell'accelerazione in funzione di altezza e lunghezza del piano.
- Si è provveduto quindi a confrontare i tempi di discesa lungo due piani inclinati di uguale lunghezza e diversa altezza e poi tra due piani inclinati di uguale altezza e diversa lunghezza.
- Le misure hanno evidenziato con buona approssimazione che l'accelerazione era direttamente proporzionale all'altezza e inversamente proporzionale alla lunghezza.
- Si è riflettuto sul fatto che il rapporto h/l corrispondesse al seno dell'angolo di inclinazione del piano e come di conseguenza l'accelerazione fosse proporzionale alla componente parallela della forza peso.
- Si è tornati a ripetere, questa volta usando la app di videotracking, le esperienze con la caduta libera che hanno confermato l'analogia con il piano inclinato.

Il punto materiale: puntualizziamo

L'uso di questa semplice app ha fornito l'occasione di chiarire meglio il concetto di punto materiale. Se il corpo di cui eseguo il tracciamento è esteso dove devo cliccare sullo schermo per segnalare la posizione?

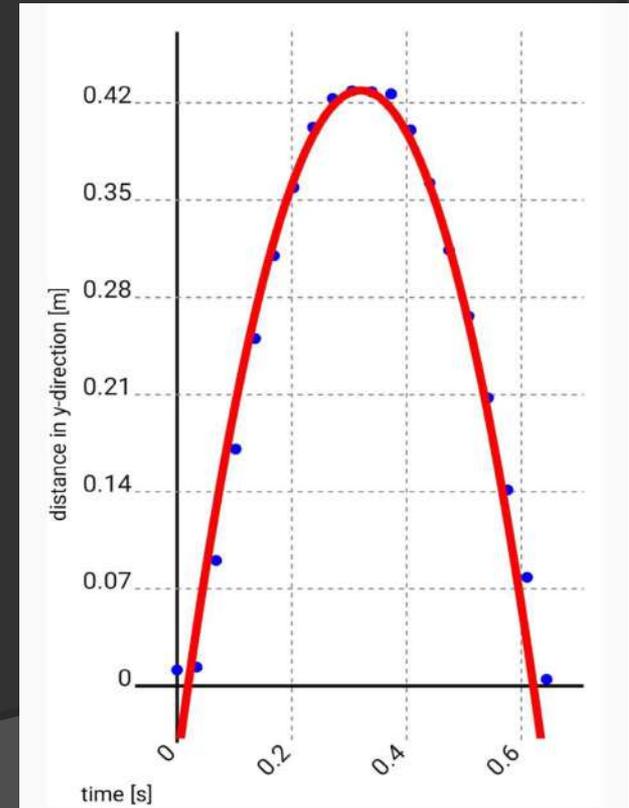
Gli studenti all'unanimità rispondono con un 'al centro' anche se non riescono a giustificare in maniera convincente la loro affermazione.

Nel caso delle esperienze con i pendoli, dovendo ricercare una proporzionalità in cui compare la lunghezza del pendolo ci si è posti il solito problema: non posso considerare il solo filo. Allora da dove a dove misurare?



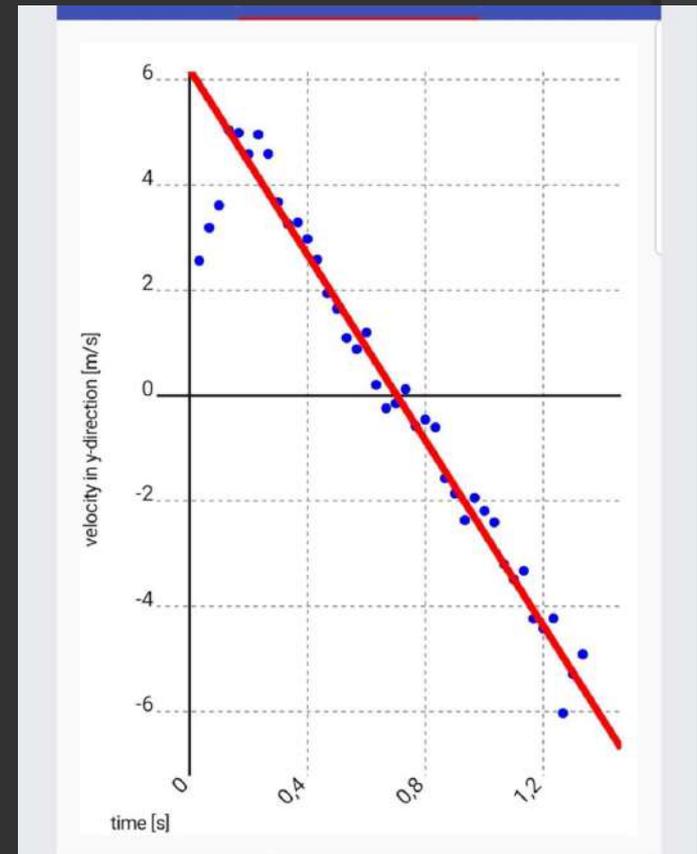
Lancio verticale verso l'alto

- A questo punto, esaurito il discorso sulla caduta libera, la nostra attenzione si è spostata sul moto di un corpo lanciato verticalmente verso l'alto.
- L'analisi con video tracking ha mostrato come i due moti, quello di salita e di discesa siano assolutamente simmetrici.
- Mentre il grafico s-t, qui in figura, dipende dalla velocità impressa al corpo, quello v-t, come vedremo, è caratterizzato da una comune pendenza. Pendenza che non dipende neppure dalla massa dei corpi.
- Gli studenti che sono riusciti a impostare le distanze reali hanno trovato un valore molto vicino a quello di g . Il docente aveva suggerito di mettere sullo sfondo del video un righello o un oggetto di lunghezza nota per tarare le distanze.



C'è sempre accelerazione?

- Importante la riflessione sul fatto che l'accelerazione sia presente sempre, anche nel punto di massima altezza: gli studenti hanno fatto molta fatica a comprendere questo fatto.
- Dai risultati del modulo di Google è uscita una netta incoerenza tra il grafico ottenuto per la velocità (in figura) e la deduzione del valore dell'accelerazione nel punto più alto: più di un quarto della classe ha scritto che era nulla.
- La discussione con gli studenti ha fatto emergere una sostanziale e diffusa confusione tra velocità nulla ed accelerazione nulla.



Il piano inclinato e il pendolo

- Uno dei primi successi di Galileo fu la scoperta dell'isocronia delle piccole oscillazioni. Ma Galileo trovò molte analogie tra il moto del pendolo e quello lungo il piano inclinato.
- Si è cominciato con l'assegnare delle esperienze qualitative da fare a casa e la compilazione di un questionario su Google Moduli. Solo dopo questa prima fase osservativa è seguita la ricerca di una proporzionalità tra tempo di oscillazione e lunghezza.
- Si è chiesto agli studenti di procurarsi del filo di cotone o di nylon o spago sottile di cui poter tagliare pezzi di lunghezza variabile e oggetti di forma e materiali diversi, che potessero essere legati facilmente al filo come piombi da pesca o da pacchi, bulloni, pezzi di legno, pezzi di spugna o di polistirolo, palline per albero di Natale et cetera.
- Costruito qualche pendolo e fatte le prime considerazioni gli studenti hanno risposto al questionario.

Il questionario

[1] Sotto quali condizioni il pendolo è in equilibrio e quali, invece, è in moto?

[2] Quando è in moto quale traiettoria descrive il corpo appeso?

[3] Si riesce, e come, a fare in modo che il moto si svolga in un piano verticale fisso (cioè che non varia nel tempo la sua giacitura spaziale)?

[4] Osserva il moto del pendolo. Esso pendola, oscilla, si muove di moto approssimativamente periodico (prova a spiegare a parole che cosa significa “periodico” e perché, nel nostro caso, il moto sarebbe solo approssimativamente periodico).

[5] In realtà, gradualmente (in modo diverso per diversi pendoli e in diverse condizioni), il pendolo oscilla con ampiezza angolare (attenzione, qui intendiamo l’ampiezza massima) sempre minore (qual’è la causa di questo fatto? Si può evitare?). Fa in modo di rendere quanto più possibile trascurabile (almeno entro un numero non troppo alto di oscillazioni) questa diminuzione dell’ampiezza.

[6] Come hai ottenuto ed entro quante oscillazioni complete hai potuto considerare il moto meno approssimativamente periodico?

[7] Che cos’è quell’intervallo di tempo che chiamiamo “Periodo”?

[8] Pendoli diversi (in che cosa diversi? Come li hai realizzati?) hanno periodi diversi?

Da cosa dipende il moto del pendolo?

- ◉ Grazie alla discussione sulle risposte al questionario, gli alunni hanno raggiunto posizioni condivise come l'utilità di misurare il periodo come l'intervallo temporale che impiega il pendolo a tornare al punto di partenza (si è discusso su come sia più scomodo misurare i passaggi per il punto a più bassa quota che corrisponde anche alla massima velocità del pendolo).
- ◉ Purtroppo molti studenti hanno commesso un errore piuttosto rilevante emerso soltanto quando hanno caricato su Classroom i video dell'esperienza: invece che fissare un'estremità del filo si erano limitati a tenere il filo con una mano!
- ◉ Ben tre studenti hanno dato come definizione di periodo la formula trovata sul libro con tanto di π e radice quadrata!
- ◉ Avendo trovato periodi diversi per i diversi pendoli e volendo cercare una qualche legge matematica si conviene di confrontare pendoli con massa diversa e uguale lunghezza, pendoli con masse diverse e stessa lunghezza.
- ◉ Si conviene, visto l'attrito dell'aria, di cercare di fare le esperienze con pendoli della stessa forma.

La ricerca di una proporzionalità

- Una volta che si è esclusa, almeno in prima battuta, l'influenza dell'ampiezza iniziale e della massa sul periodo di oscillazione si è cercata una proporzionalità tra periodo e lunghezza del filo.

$L_1 = \text{---}$ $L_2 = \text{---}$
 (scegliere magari $L_1 = 2L_2$ o comunque un rapporto tipo $\frac{1}{3}, \frac{3}{4}$)

invece di cronometrare il periodo T di 1 sola oscillazione misuratele n (4, 5, 10)

durata dell'oscillazione per angoli piccoli è indipendente dall'angolo
 (ISOCRONIA DELLE PICCOLE OSCILLAZIONI scoperta da Galileo)



T_{medio} ed L sono legate da una proporzionalità

diretta $T/L = \text{cost}$ (oppure L/T)
 inv. $T \cdot L = \text{cost}$
 quad $T^2/L = \text{cost}$ (oppure L/T^2)
 quasi inv. $L \cdot T^2 = \text{cost}$

- La proporzionalità tra L e T^2 è risultata piuttosto chiara per tutte le esperienze. Qui a fianco il *raccoglimento* dati di G. che ha utilizzato come periodo non quello della singola oscillazione ma di n oscillazioni.
- Un errore molto utile per discutere sul fatto che pur variando il valore della costante non varia il tipo di proporzionalità.

ESPERIENZA CON I PENDOLI

Raccoglimento dei dati: ho scelto tre lunghezze per il filo che sono una il doppio dell'altra.

- $L_1 = 7\text{cm}$
- $L_2 = 14\text{cm}$
- $L_3 = 28\text{cm}$

Successivamente ho preso per cinque volte il tempo delle oscillazioni costanti per ogni lunghezza

	T1	T2	T3	T4	T5	T medio
L1	5,1s	6,0s	5,4s	6,1s	6,3s	5,8s
L2	8,0s	8,3s	7,9s	8,2s	7,8s	8,0s
L3	11,8s	12,2s	10,9s	11,8s	11,0s	11,5s

Ho cercato che tipo di proporzionalità c'era tra lunghezza e il periodo, ed è la proporzionalità quadratica inversa L/T^2

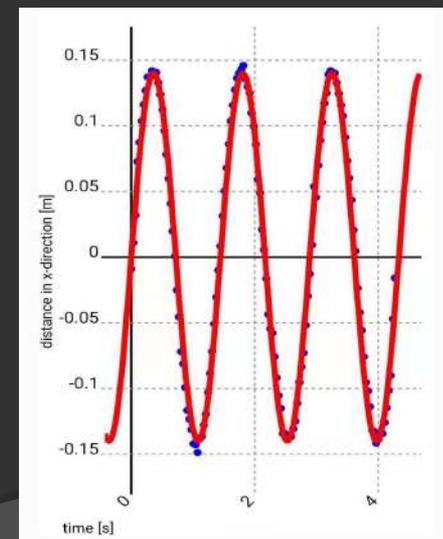
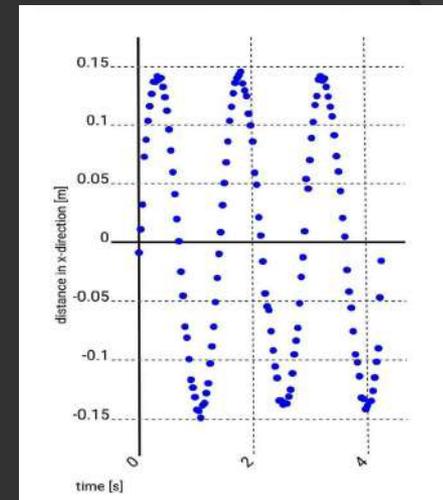
$$L_1 = 7 / (5,08^2) = 0,2 \text{ cm/s}^2$$

$$L_2 = 14 / (8,0^2) = 0,2 \text{ cm/s}^2$$

$$L_3 = 28 / (11,5^2) = 0,2 \text{ cm/s}^2$$

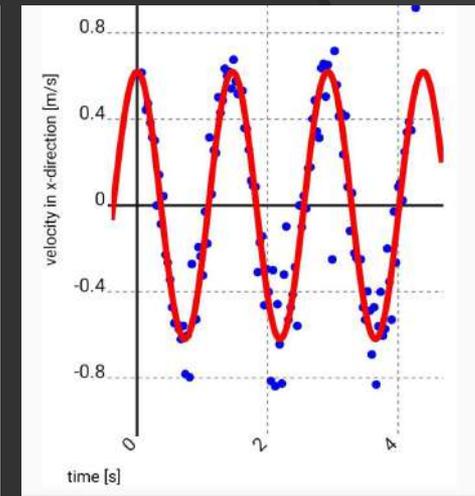
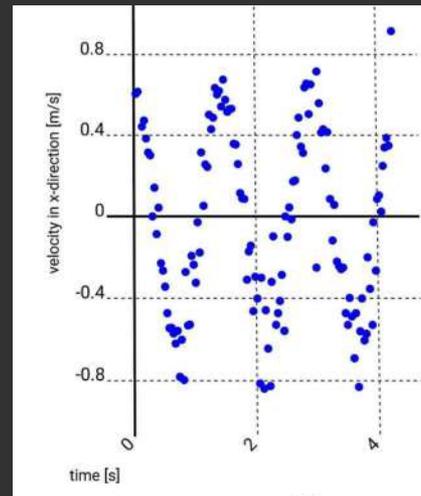
L'analisi con video tracking: grafico s-t

- Dall'esame del grafico posizione-tempo gli studenti riescono a inferire correttamente i punti in cui la velocità è nulla e dove assume valore massimo.
- Il docente spiega che questo moto periodico viene detto armonico e può essere descritto da una curva chiamata seno o coseno.
- Definito il significato di ampiezza dell'oscillazione e periodo viene chiesto di verificare che la funzione che meglio approssima i punti campione è del tipo seno o coseno.
- Anche se i grafici sono diversi, a seconda che si sia scelto un sistema di riferimento con origine nel punto di partenza oppure nel punto più basso della traiettoria, conservano la stessa forma, operando una traslazione possiamo farli coincidere.

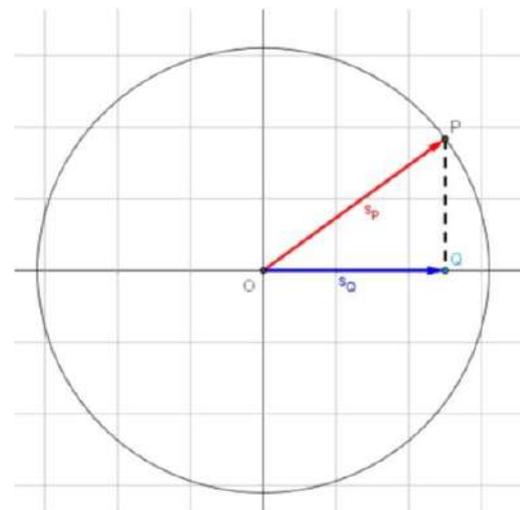


L'analisi con video tracking: grafico v-t

- Dall'esame del grafico velocità tempo gli studenti riescono a inferire correttamente i punti in cui l'accelerazione è nulla e dove assume valore massimo.
- Si riflette sul fatto che la forma e il periodo sono gli stessi del grafico s-t.
- A questo punto si è approfondito meglio il rapporto tra l'ampiezza delle oscillazioni e il valore della velocità e dell'accelerazione collegandolo al moto circolare uniforme grazie anche all'ausilio di GeoGebra.
- Il rapporto tra le ampiezze della velocità e della posizione sono stati in accordo con i dati sperimentali.



Consideriamo un punto materiale P che si muove di moto circolare uniforme con velocità angolare ω su una circonferenza di raggio A. Chiamiamo Q la proiezione di P su un diametro della circonferenza. Supponiamo per semplicità che all'istante iniziale $t_0 = 0$ l'angolo spazzato dal raggio vettore OP sia nullo ($\theta_0 = 0$). Assegnate queste condizioni iniziali avremo che l'angolo spazzato al generico istante t sarà pari a $\theta = \omega t$.



I moduli dei vettori posizione di P e Q misurano rispettivamente:

$$s_p = A$$

$$s_Q = A \cos(\theta) = A \cos(\omega t)$$

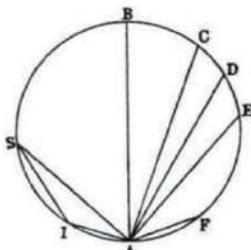
La scoperta di Richer e un'idea per simulare g

- Gli studenti hanno sperimentalmente verificato la proporzionalità quadratica tra periodo e lunghezza del pendolo e l'indipendenza di T dalla massa del pendolo e dall'angolo di partenza.
- Sono queste le uniche grandezze in gioco?
- Come già detto qualche studente ha cercato la formula sul libro dove compare anche g .
- Viene allora narrata la scoperta di Jean Richer che tra il 1671 e il 1673 durante una spedizione scientifica nel Sudamerica si accorge che i pendoli portati da Parigi battono più lentamente. Perché? Come correttamente intuiranno Newton e Huygens ciò dipende dalla non perfetta sfericità della Terra e dalla forza centrifuga.
- Non potendo verificare la variabilità di g andando al Polo o all'Equatore viene proposta agli studenti una seconda esperienza con i pendoli suggerita da Zanetti: cosa succede se aumentiamo la forza verso il basso di un pendolo di ferro con una calamita?
- Alla forza peso si somma la forza magnetica che di fatto accresce apparentemente il valore di g (visto che non varia la massa).
- Abbiamo verificato in laboratorio che effettivamente il periodo diminuisce sensibilmente.

Testiamo le competenze: il teorema delle corde

- La *proposizione molto bella* scoperta da Galileo, facilmente deducibile dai teoremi di Euclide è stata oggetto di una verifica guidata svolta in fasi successive (in basso il testo).
- Dal momento che in matematica si stava trattando la circonferenza è stata proposta agli studenti una verifica guidata mista in cui si sono cimentati con questo teorema. I risultati hanno confermato come ancora molti studenti si trovino spiazzati da prove multidisciplinari.

L'immagine in figura è tratta da una lettera di Galileo a Guidobaldo Del Monte dove enuncia il suo teorema delle corde: un corpo che, partendo da fermo, scende lungo una qualsiasi corda AC, AD, AE, AF, raggiunge il punto A impiegando lo stesso tempo che impiegherebbe un altro corpo a cadere in verticale lungo il diametro AB.



Prima parte: geometria analitica

1. Disegna e scrivi l'equazione della circonferenza γ passante per l'origine degli assi cartesiani, con centro C sull'asse delle y e raggio $r = 5$.
2. Trova le coordinate del punto R appartenente alla circonferenza γ , di ascissa positiva e ordinata uguale a 4.
3. Trova le coordinate del punto Q appartenente alla circonferenza γ , di ascissa positiva, tale che la corda OQ misuri $2\sqrt{5}$.
4. Trova le coordinate del punto di tangenza P tra la circonferenza γ e la retta di equazione $4x + 3y - 40 = 0$.
5. Detti R', P', Q' le proiezioni, rispettivamente dei punti R, P, Q sull'asse delle x, verifica che:

$$\frac{OR^2}{RR'} = \frac{OQ^2}{QQ'} = \frac{OP^2}{PP'} = 2r$$

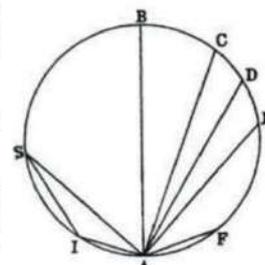
Seconda parte: fisica

Per questa seconda parte ci rifaremo alla circonferenza trovata prima ed in particolare ai punti $P(4,8)$, $Q(4,2)$, $R(2\sqrt{6}, 6)$

6. Considera ora le corde come dei piani inclinati. Dimostra che il tempo di discesa lungo la corda OR è pari al tempo di caduta in verticale lungo il diametro. Assumi come unità di misura il metro.

7. Generalizza il risultato e dimostralo per un qualsiasi punto della circonferenza di generica ordinata y.

Galileo dimostra che il tempo di discesa lungo una spezzata tra due punti della circonferenza (ovvero, come nella figura a lato da S ad A passando per I) è sempre minore di quello impiegato per andare direttamente da un estremo all'altro della corda SA.



8. Riferendoti alla circonferenza γ di equazione $x^2 + y^2 + 10y = 0$ verifica che il tempo impiegato per andare da R a Q e poi da Q ad O è effettivamente minore del tempo di discesa da R ad O.

9. Galileo deduce alcune analogie con il pendolo giustificando l'isocronia delle piccole oscillazioni. Immagina di avere un pendolo fissato nel centro della circonferenza e lungo quanto il raggio: da quale relazione sarebbero legati il periodo del pendolo e il tempo di discesa lungo il piano inclinato?

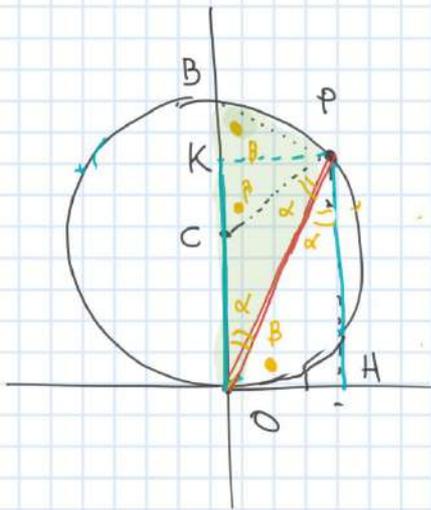
Terza parte: geometria

10. Dimostra per via algebrica oppure geometrica che presa una qualsiasi corda OA e detto B la proiezione di A sull'asse delle x vale che:

$$\frac{OA^2}{AB} = 2r$$

C'era una volta Euclide

- Nonostante la dimostrazione del teorema sia molto semplice, soltanto alcuni studenti sono riusciti a usare la geometria euclidea mentre quasi tutti si sono trovati più a loro agio con la geometria analitica.
- Inoltre non tutti rammentavano che ogni triangolo inscritto in una semicirconferenza è rettangolo.
- Solo un terzo della classe, e di questo nemmeno tutti in maniera corretta, ricordava gli enunciati dei teoremi di Euclide.



$\hat{O}PB$ è rettangolo

Considero l'altezza \overline{PK} . Per Euclide:

$$\overline{OP}^2 = \overline{OB} \cdot \overline{OK}$$

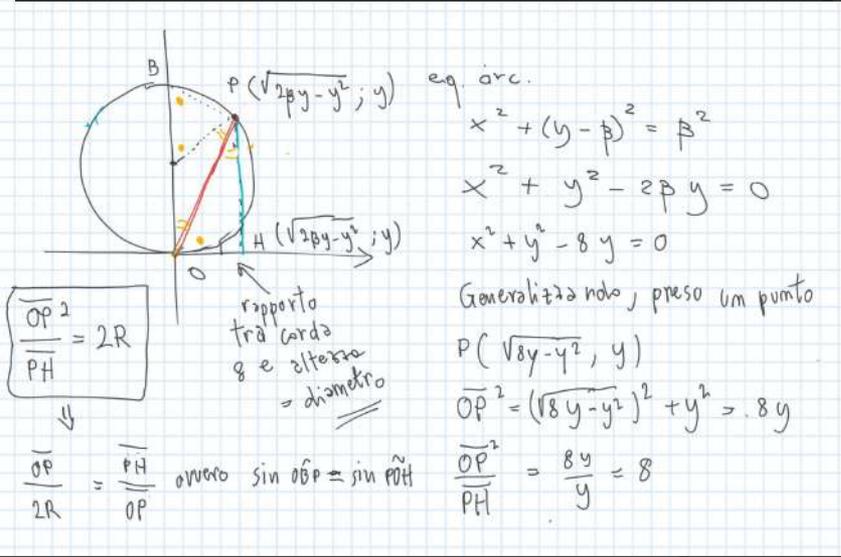
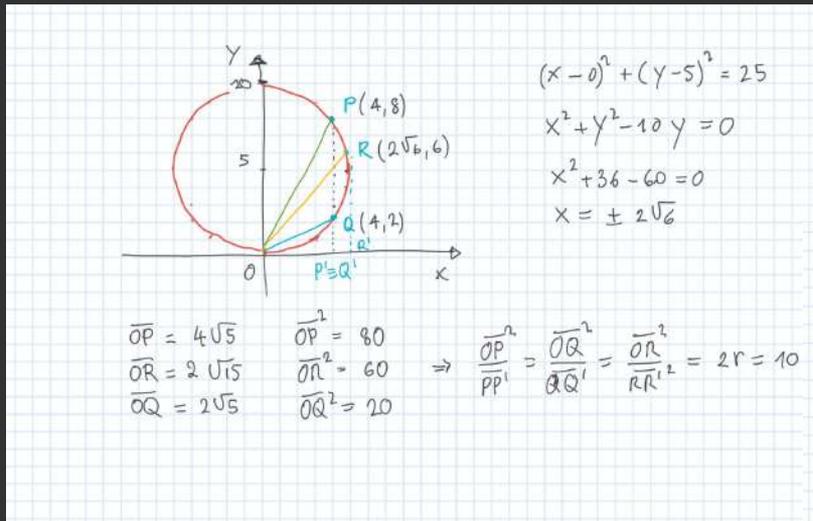
ma \overline{OB} è il diametro e $\overline{OK} = \overline{PH}$

pertanto:

$$\boxed{\frac{\overline{OP}^2}{\overline{PH}} = 2R}$$

La comodità della geometria analitica

- Tutta la classe ha dichiarato di preferire l'uso della geometria analitica ma molti però confondono il caso generale con quello particolare (o meglio, non sapendolo affrontare cercano rifugio nel ripetere con numeri diversi lo stesso problema): invece di considerare un generico punto (x,y) prendono in esame un ulteriore punto di coordinate note.



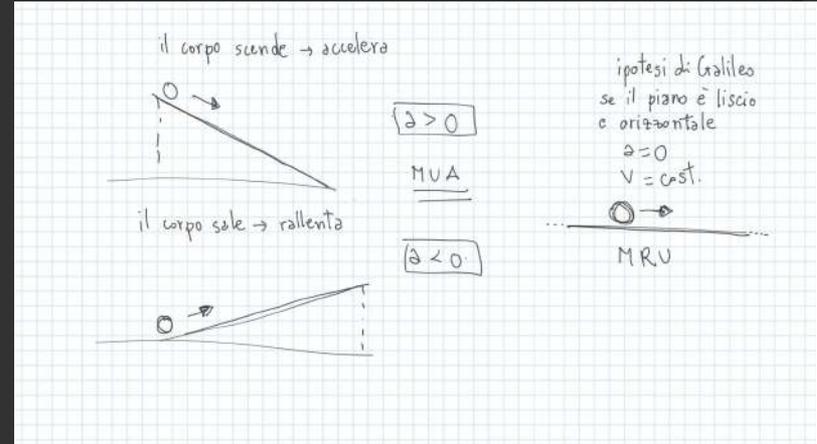
Una congettura errata

- ◉ Dimostriamo che si impiega meno tempo per scendere da S ad A passando per il punto I piuttosto che lungo la corda AS.
- ◉ Se andiamo da A a S lungo una spezzata, ovvero una serie di corde consecutive, allora all'aumentare del numero delle corde si impiegheranno tempi via via minori.
- ◉ Galileo, non possedendo strumenti matematici adeguati, fa una congettura che si rivelerà poi errata, ovvero che per andare da A a S nel tempo più breve, la traiettoria da seguire corrisponda proprio all'arco di circonferenza di estremi A e S.
- ◉ In realtà la curva lungo la quale si impiega minor tempo (brachistocrona) è la cicloide come sarà dimostrato nel 1696 da Johann Bernoulli. Una dimostrazione che era anche una sfida lanciata ai matematici del tempo e a cui seguiranno dimostrazioni alternative di Jakob Bernoulli, fratello di Johann, di Newton e del marchese de L'Hopital.

Dal piano inclinato al moto rettilineo uniforme

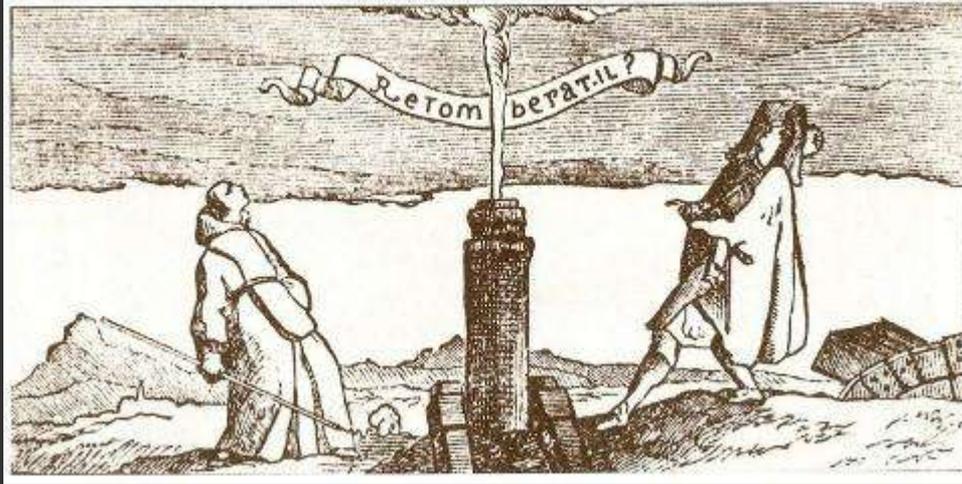
- Un corpo che scende lungo un piano inclinato accelera mentre quando sale decelera. Pertanto lungo un piano orizzontale non dovrebbe né accelerare né decelerare. Galileo avanza quindi l'ipotesi del moto rettilineo uniforme. Qui la traduzione, dal latino, del brano presente nei *Discorsi*:

“è lecito aspettarsi che, qualunque grado di velocità si trovi in un mobile, gli sia per sua natura indelebilmente impresso, purché siano tolte le cause esterne di accelerazione o di ritardamento; il che accade soltanto nel piano orizzontale; infatti nei piani declivi è di già presente una causa di accelerazione, mentre in quelli acclivi [è già presente una causa] di ritardamento: da ciò segue parimenti che il moto sul piano orizzontale è anche eterno; infatti, se è equabile, non scema o diminuisce, né tanto meno cessa.”



- Per la verifica di questa ipotesi bisognerebbe eliminare l'attrito. Come fare? Lanciando, come vedremo, orizzontalmente un corpo e scomponendone il moto in aria lungo due direzioni ortogonali.

Lost in translation



“Ricadrà?” dal trattato *Nouvelles conjectures sur la pesanteur*, del 1690 del matematico francese Pierre Varignon, cui si deve la regola del parallelogramma.

- Viene proposta agli studenti questa buffa scenetta. Rappresenta un esperimento bislacco compiuto nella primavera del 1638 nei dintorni di Parigi dal monaco Marin Mersenne e dall'ingegnere militare Pierre Petit. Il monaco, grande matematico, fraintese l'invito di Cartesio di eseguire un esperimento suggeritogli dalla lettura di Galileo in cui si parlava di un cannone che sparava parallelamente all'orizzonte.
- Dell'esperimento ci sono due versioni: la prima racconta che la palla di cannone non ricadde più e non fu mai ritrovata tra lo stupore della strana coppia. La seconda, più ironica, è dell'astronomo di fine ottocento Camille Flammarion. Racconta che furono sparate tre palle: la prima scomparve, la seconda ricadde seicento metri a occidente e la terza seicento metri a oriente. A quel punto i due conclusero che, per la legge delle medie, la quarta palla sarebbe ricaduta proprio su di loro e interruppero immediatamente l'esperimento!
- Ma da dove proveniva quest'idea dei cannoni? E cosa se ne voleva dedurre? E in realtà, sarebbe stato un esperimento decisivo per dire se a muoversi era la Terra oppure il Sole?

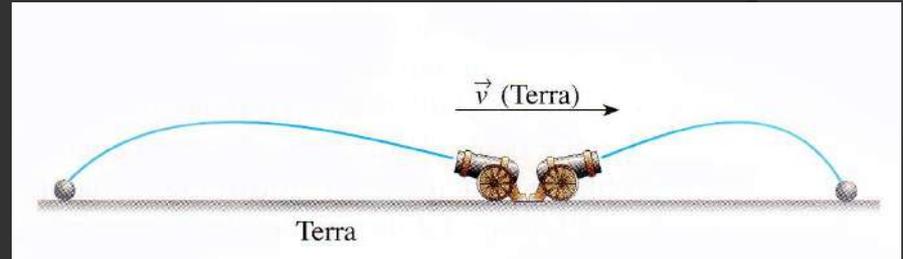
Le catene magnetiche di Keplero

- C'era già stata un'accanita controversia tra Giovanni Keplero e Tycho Brahe sull'argomento. Così Keplero si esprimeva nella Lettera a Fabricius (10 novembre 1608):

“Tu vuoi che ti chiarisca la soluzione dell'argomento di Tycho contro il movimento della terra. Esso non è così potente come il colpo di questa macchina (il cannone). E' chiaro che coincide con la famosa obiezione: com'è possibile – se nel frattempo la terra si muove - che il proiettile lanciato in alto ricada al medesimo posto? Bisogna rispondere che non solo nel frattempo la terra si muove, ma anche, con essa, le catene magnetiche e invisibili , con le quali la pietra è attaccata alle parti soggiacenti e attigue della terra , e con le quali è attratta verso la terra per la via più breve, vale a dire per la perpendicolare. Ora nel caso del moto violento verso l'alto , tutte le catene si tendono pressappoco allo stesso modo; al contrario, sono le catene occidentali che si tendono quando il proiettile, dalla forza del cannone, è lanciato verso l'Oriente, e le orientali, quando il fuoco sospinge il proiettile verso l'Occidente. Ora, il movimento simultaneo della terra e di tutte le catene, in un caso o nell'altro, non è né di aiuto , né di impedimento. Infatti, la violenza del movimento che proietta il proiettile cade all'interno del complesso di tutte le catene, che sono talmente forti che un vento contrario violentissimo non può niente contro di esse, a maggior ragione quindi l'aria calma che ruota con la terra”.

Ancora Keplero e l'obiezione aristotelica

- Keplero, nell'opera *Epitome astronomiae copernicanae* affronta l'argomento dei due cannoni che sparano in direzioni opposte:



“Così una grande palla il cui volo nell'aria duri due minuti, percorre sulla terra un miglio tedesco verso l'Occidente e durante questo tempo la terra, all'equatore, percorre in senso inverso otto miglia. Così, in rapporto con lo spazio del mondo il proiettile è trascinato in senso inverso al movimento violento, vale a dire verso l'Oriente, a una distanza di sette miglia e l'esplosione che lo lancia in una direzione contraria rispetto a questo movimento della terra non gli serve a nient'altro che a non fargli percorrere anche questo ottavo miglio e a far sì che il proiettile si muova più lentamente verso l'Oriente. Giacché la polvere non può strapparla interamente dalle mani, per così dire, della terra .. e il proiettile rimane sempre nel campo della virtù di attrazione di questa. E, al contrario, il proiettile lanciato verso l'Oriente è trasportato a una distanza di otto miglia dal raptus della terra e, dato che è stato violentemente lanciato dall'esplosione verso l'Oriente vi aggiunge esso stesso il nono miglio. Così, che sia tirato verso l'Oriente o verso l'Occidente, il proiettile si dirige sempre verso l'Oriente, benché un po' più in un caso che in un altro. Ma lo spazio del mondo così messo insieme non ha niente a che vedere con lo spazio che gli uomini possono misurare sulla terra. Sulla terra lo spazio percorso dal proiettile è pressappoco il medesimo nei due casi, perché la forza è la medesima, e i legami magnetici sono gli stessi.”

- Il docente fa notare la lontananza tra Keplero e Galileo: a differenza dell'astronomo e matematico tedesco, Galileo parla in termini cinematici e non cerca di dare giustificazioni prive di fondamento fisico (le *invisibili catene magnetiche*).

La freccia scoccata dalla carrozza

- Viene letto in classe questo passo del *Dialogo dei massimi sistemi*

Salviati: Io vorrei che noi trovassimo qualche modo di far una esperienza corrispondente al moto di questi proietti, come quella della nave al moto de i cadenti da alto a basso, e vo pensando la maniera.

Sagredo: Credo che prova assai accomodata sarebbe il pigliare una carrozzetta scoperta, ed accomodare in essa un balestrone da bolzoni a meza elevazione, acciò il tiro riuscisse il massimo di tutti, e mentre i cavalli corressero, tirare una volta verso la parte dove si corre, e poi un'altra verso la contraria, facendo benissimo notare dove si trova la carrozza in quel momento di tempo che 'l bolzone si ficca in terra, sí nell'uno come nell'altro tiro; ché cosí potrà vedersi per appunto quanto l'uno riesce maggior dell'altro.



Simplicio: Parmi che tale esperienza sia molto accomodata; e non ho dubbio che 'l tiro, cioè che lo spazio tra la freccia e dove si trova la carrozza nel momento che la freccia si ficca in terra, sarà minore assai quando si tira verso il corso della carrozza, che quando si tira per l'opposito.

Salviati: Talché per far che la freccia tirata tanto per l'uno quanto per l'altro verso s'allontani egualmente dalla carrozza corrente, bisogna che se nel primo tiro dell'esempio proposto ella si parte, verbigrazia, con quattro gradi di velocità, nell'altro tiro ella si parta con due solamente. Ma se si adopra il medesimo arco, da esso ne riceve sempre tre gradi.

Simplicio: Cosí è; e per questo, tirando con l'arco medesimo, nel corso della carrozza i tiri non posson riuscire eguali.

Segue nel testo un semplice esempio numerico assegnando alla carrozza un grado di velocità e alla freccia quattro gradi nel senso di marcia e due in quello opposto.

Le velocità si compongono e il moto è relativo

Salviati: Mi ero scordato di domandar con che velocità si suppone, pur in questa esperienza particolare, che corra la carrozza.

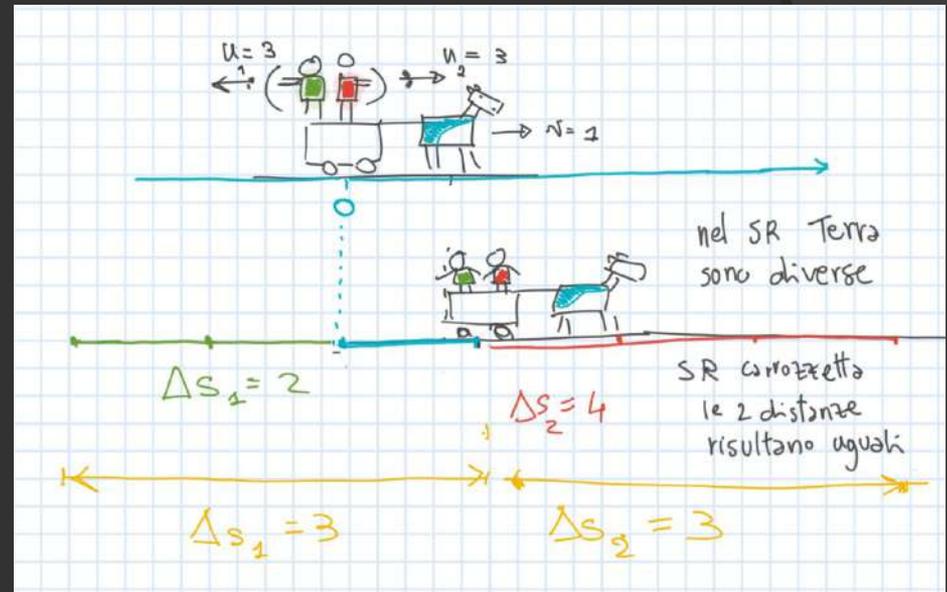
Simplicio: La velocità della carrozza bisogna supporla di un grado, in comparazione di quella dell'arco, che è tre.

Salviati: Sí, sí, cosí torna il conto giusto. Ma ditemi: quando la carrozza corre, non si muovono ancora con la medesima velocità tutte le cose che son nella carrozza?

Simplicio: Senza dubbio.

Salviati: Adunque il bolzone ancora, e l'arco, e la corda su la quale è teso.

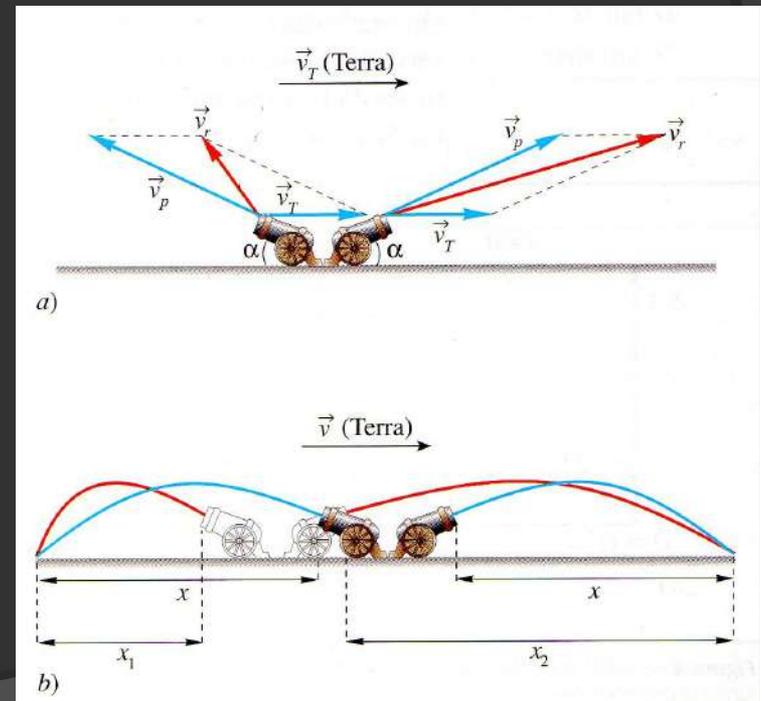
Simplicio: Cosí è. Salviati: Adunque, nello scaricare il bolzone verso il corso della carrozza l'arco imprime i suoi tre gradi di velocità in un bolzone che ne ha già un grado, mercé della carrozza che verso quella parte con tanta velocità lo porta, talché nell'uscir della cocca e' si trova con quattro gradi di velocità; ed all'incontro, tirando per l'altro verso, il medesimo arco conferisce i suoi medesimi tre gradi in un bolzone che si muove in contrario con un grado, talché nel separarsi dalla corda non gli restano altro che dua soli gradi di velocità. Ma già voi stesso avete deposto che per fare i tiri eguali bisogna che il bolzone si parta una volta con quattro gradi e l'altra con due: adunque, senza mutar arco, l'istesso corso della carrozza è quello che aggiusta le partite, e l'esperienza è poi quella che le sigilla a coloro che non volessero o non potessero esser capaci della ragione.



La soluzione di Galileo

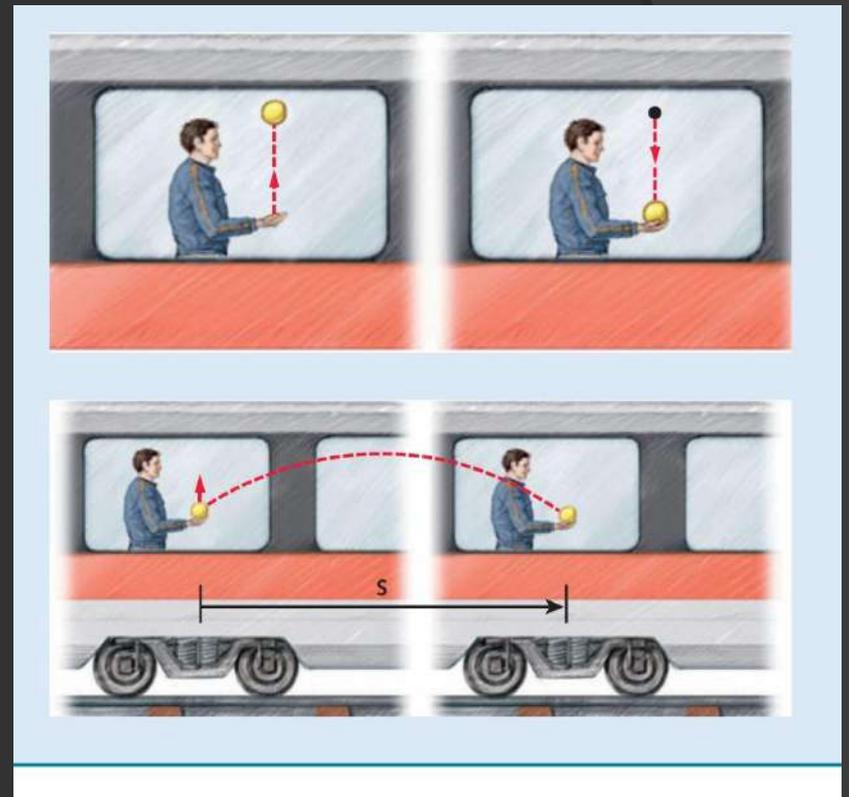
“Ora applicate questo discorso all'artiglieria, e troverete che, muovasi la Terra o stia ferma, i tiri fatti dalla medesima forza hanno a riuscir sempre eguali, verso qualsivoglia parte indirizzati. L'errore di Aristotile, di Tolomeo, di Ticone, vostro, e di tutti gli altri, ha radice in quella fissa e inveterata impressione, che la Terra stia ferma, della quale non vi potete o sapete spogliare né anco quando volete filosofare di quel che seguirebbe, posto che la Terra si movesse; e così nell'altro argomento, non considerando che mentre che la pietra è su la torre, fa, circa il muoversi o non muoversi, quel che fa il globo terrestre, perché avete fisso nella mente che la Terra stia ferma, discorrete intorno alla caduta del sasso sempre come se si partisse dalla quiete, dove che bisogna dire: Se la Terra sta ferma, il sasso si parte dalla quiete e scende perpendicolarmente; ma se la Terra si muove, la pietra altresì si muove con pari velocità, né si parte dalla quiete, ma dal moto eguale a quel della Terra, col quale mescola il sopravveniente in giù e ne compone un trasversale”.

- Galileo torna al problema dei cannoni, gli studenti dimostrano di aver capito l'analogia con l'esempio della freccia scagliata dalla carrozza.
- È seguita una serie di esercizi per consolidare i concetti, prima trattando la composizione di moti che hanno la stessa direzione poi, estendendola, come in figura, al caso bidimensionale



La composizione dei moti

- Viene proposta agli studenti questa immagine e li si invita a riflettere su quale sia la traiettoria della sferetta per un osservatore sul treno ed uno fuori.
- Si discute sui tempi di volo nei due casi. Tutti sono d'accordo che devono essere gli stessi.
- Si approda alla relazione matematica ben nota agli studenti: l'equazione che descrive la traiettoria è quella di una parabola.



$$y = v_{\text{pallina}} \cdot t - \frac{1}{2} g t^2$$
$$x = v_{\text{treno}} \cdot t$$
$$\Rightarrow y = \frac{v_{\text{pallina}}}{v_{\text{treno}}} x - \frac{1}{2} \frac{g}{v_{\text{treno}}^2} \cdot x^2$$

Handwritten notes: $c b$ (above the fraction), $a < 0$ (above the quadratic term), and a green arrow pointing to the quadratic term.

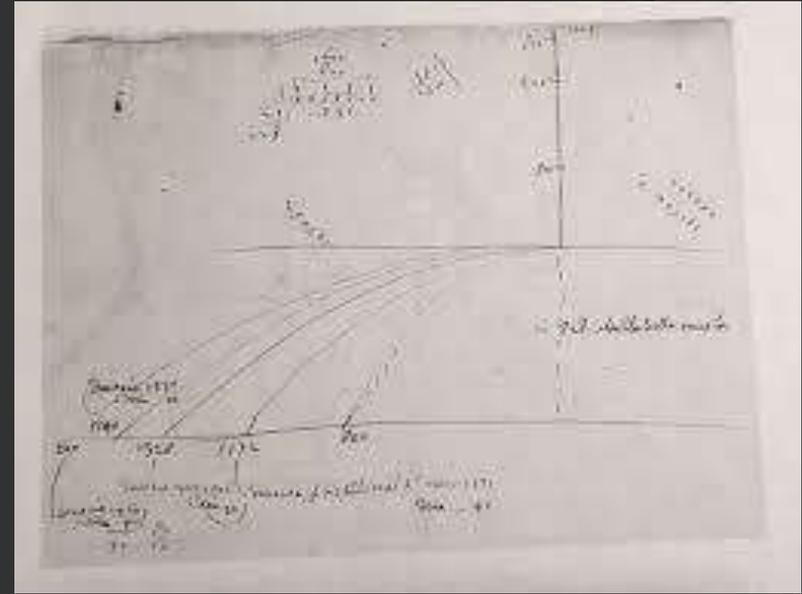
Moto parabolico con lancio orizzontale

- Così, come un osservatore fermo rispetto all'uomo nel treno vede una traiettoria parabolica, possiamo pensare di ottenere lo stesso se forniamo alla sferetta una velocità orizzontale.
- Abbiamo usato in classe il dispositivo di lancio qui a lato in figura.
- Il dispositivo, nel momento in cui viene rilasciata la molla premendo sulla linguetta di metallo, lascia cadere le due sferette di acciaio: la prima, più vicina alla molla, cade di moto verticale mentre la seconda cade con una certa velocità orizzontale.
- Gli studenti realizzano il video dell'esperienza. Rivista alla moviola i tempi di caduta di una sferetta in verticale e con direzione iniziale orizzontale sono uguali.
- Si comprende così la sostanziale equivalenza tra i moti visti da sistemi di riferimento diversi.



Verso il principio di inerzia

- Come dimostrare che una sfera lanciata lungo un piano orizzontale continua localmente il proprio moto a velocità costante?
- Galileo non ha modo di eliminare gli attriti e così sfrutta il principio di composizione dei moti (in figura un suo manoscritto corredato dei relativi dati sperimentali).
- Sferette che cadono da un tavolo con velocità orizzontali diverse atterrano a distanze direttamente proporzionali con le velocità iniziali.
- La gittata è proporzionale alla radice del prodotto delle due altezze (piano inclinato e tavolo).



$v_0 = \sqrt{2gh_1}$

$d \leftarrow \text{dipende solo da } h_1 \text{ e } h_2!$

$$\begin{cases} d = v_0 \cdot t_{\text{CADUTA}} \\ 0 = h_2 - \frac{1}{2} g t_{\text{CADUTA}}^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t_{\text{CADUTA}} = \frac{d}{v_0} \\ h_2 = \frac{1}{2} g \frac{d^2}{v_0^2} \end{cases}$$
$$h_2 = \frac{1}{2} g \frac{d^2}{2gh_1} \Rightarrow d^2 = 4h_1h_2 \Rightarrow d = 2\sqrt{h_1h_2}$$

L'apparato sperimentale

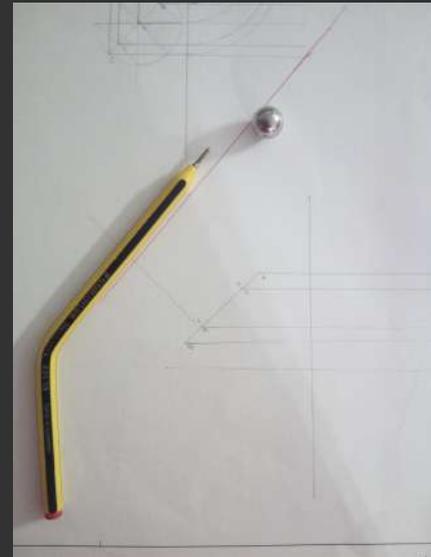
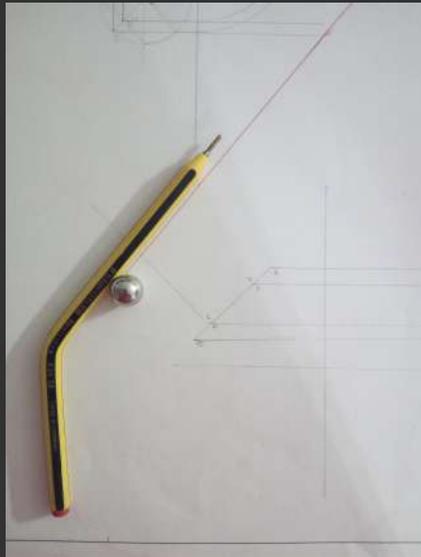
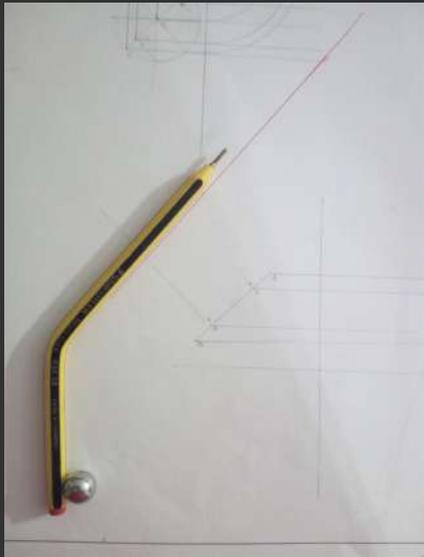
- Gli studenti hanno realizzato a casa l'esperimento, raccolto ed analizzato i dati.
- Come nel caso del piano inclinato si è riflettuto sul fatto che tutte le distanze erano più o meno lontane dal valore calcolato.
- Quelli che avevano ottenuto i risultati più vicini avevano usato piani inclinati più corti o pendenze maggiori o palline più grandi, ovvero tre casi dove era minore il rotolamento e quindi la *perdita di velocità* (più correttamente la minore accelerazione).
- Non avendo ancora la nozione di energia ci si è arrangiati parlando in termini di attrito: una sferetta può strisciare o rotolare sul piano ma, contrariamente a quanto si potrebbe pensare, è nel primo caso che l'attrito è minore. Si è usato come esempio quello di una ruota su un asfalto viscido.
- Gli studenti hanno verificato che correggendo i calcoli di un fattore 0.85 ottenevano valori molto prossimi a quelli sperimentali (*)



usando il momento di
inerzia della sfera e
confrontandolo con
un corpo che striscia

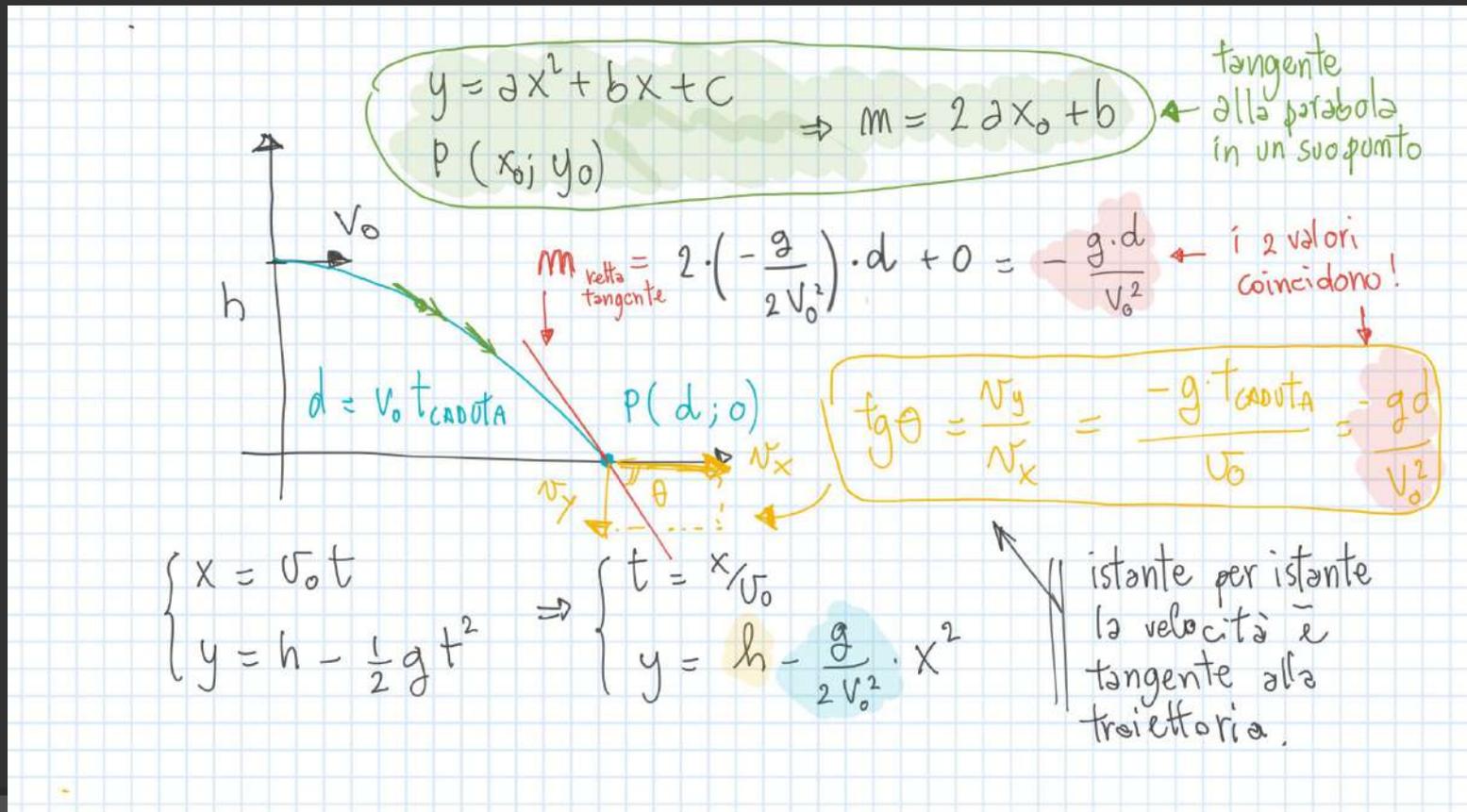
L'esperimento della guida interrotta

Si è ricordato agli studenti il semplice esperimento, qui eseguito con una biro e una sferetta di metallo, della guida interrotta già vista al momento di dedurre la direzione del vettore velocità nel moto circolare uniforme: in assenza di forze, in questo caso la reazione vincolare della guida, la sferetta continua a muoversi di moto rettilineo lungo la tangente alla curva.



Geometria analitica: la ricerca della tangente

La matematica di Galileo è tutta basata sulla geometria euclidea e le proporzioni. Noi però possiamo usare la geometria analitica, che ben si raccorda al programma di matematica, per giungere in maniera semplice a importanti risultati: qui ad esempio dimostriamo che nel punto di contatto col terreno la retta tangente alla traiettoria è parallela al vettore velocità.

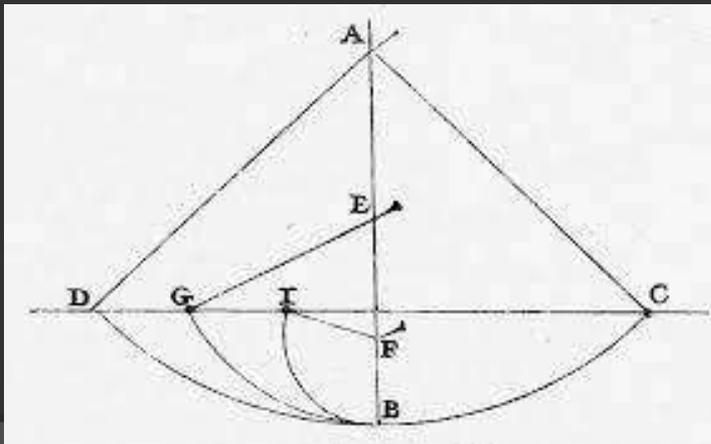


Il pendolo interrotto

Viene proposta agli studenti questa esperienza galileiana, sotto l'immagine tratta dai *Discorsi*, in cui un piolo posto lungo la verticale del pendolo, nel disegno posto nel punto E o F, pur deviandone la traiettoria, non ne impedisce la risalita fino alla stessa altezza da cui era partito.

Viene proposto un breve video su YouTube dell'esperimento.
(URL: [https://www.youtube.com/watch?v=0GFm_11ExLrg](https://www.youtube.com/watch?v=0GFm_1ExLrg))

Viene chiesto agli studenti se colgono delle affinità tra quanto visto e i piani inclinati. Inferiscono correttamente che la velocità acquisita dal pendolo dipende solo dall'altezza anche se una parte degli studenti tenda a parlare in termini di forza ed energia.



Il moto dei proiettili

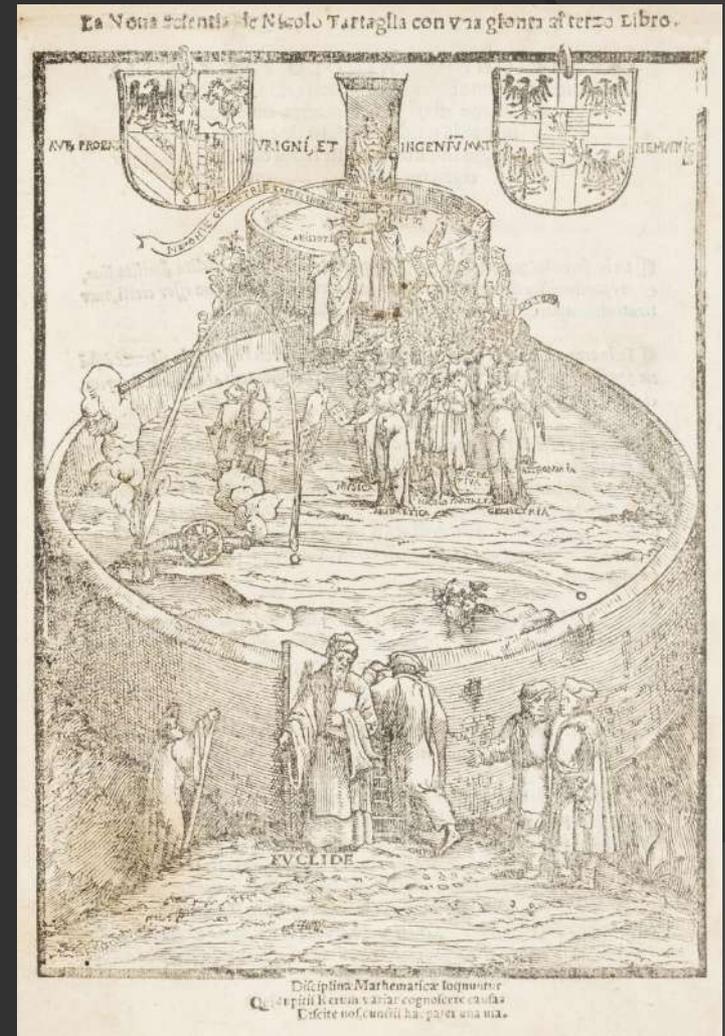
Il docente racconta agli studenti di come, a partire dal Cinquecento, con lo sviluppo delle armi da fuoco, fossero diventati importanti gli studi sulla balistica.

Mostra agli studenti il frontespizio del libro di *La Nova Scientia* pubblicato nel 1537 da Niccolò Tartaglia.

Mostra loro la traiettoria della palla di cannone. Chiede: Vi sembra possibile?

Tutti avanzano dubbi in proposito. I più sono d'accordo che la traiettoria sia asimmetrica anche se non sanno come giustificarlo.

Qualcuno avanza l'ipotesi ci sia di mezzo una parabola riferendosi all'esercizio sulla relatività della ragazza sul treno.



Frontespizio del libro di Tartaglia

L'esperienza di Guidobaldo del Monte

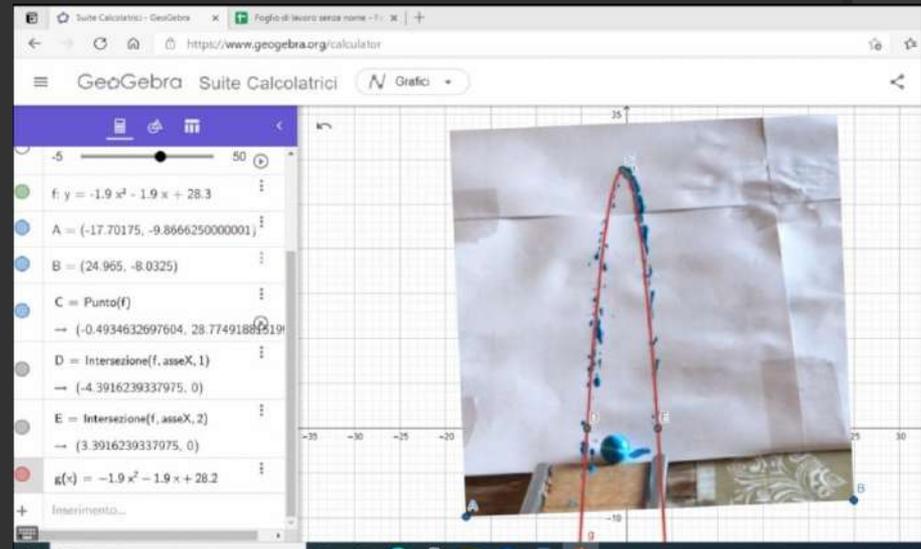
Per questo esperimento siamo partiti, per semplicità di lettura, da questo immaginario racconto in prima persona di Galileo piuttosto che dagli scritti originali.

Durante il mio primo viaggio da Pisa a Padova ho trascorso alcuni giorni con Guidobaldo del Monte, un uomo incredibilmente saggio e disponibile. Oltre a essere un buon matematico, è stato anche ispettore delle fortificazioni per la Toscana e si è dilettrato con le traiettorie delle palle di cannone. Per lui il problema di quando il moto naturale inizia ad agire in situazioni in cui un proiettile viene sparato a vari angoli rispetto all'orizzonte aveva un'importanza pratica. Ci è capitato di parlarne mentre sorseggiavamo vino nel suo giardino, accanto ad una tettoia con il tetto inclinato. Può darsi che abbia accennato al trucco di rallentare il moto naturale con l'aiuto di un piano inclinato; forse è venuto in mente a entrambi nello stesso momento che una palla fatta rotolare in salita lungo la tettoia inclinata di un certo angolo rispetto all'orizzontale avrebbe potuto simulare un colpo di cannone al rallentatore. Abbiamo fatto l'esperimento utilizzando una palla tinta d'inchiostro fatta rotolare su un piano più adatto di quello della tettoia, [...] la palla ha tracciato una linea che assomiglia ad una parabola, un'iperbole o, come ci piace pensare, alla curva formata da una catena fissata a due supporti molto distanti fra loro, ma capovolta (Heilbron)

L'esperienza degli studenti

- Agli studenti è stato proposto di ripetere l'esperienza a casa. La traccia lasciata dalla pallina è stata ottenuta in vari modi, bagnando la sferetta con acqua o inchiostro oppure sporcandola con farina o gesso.

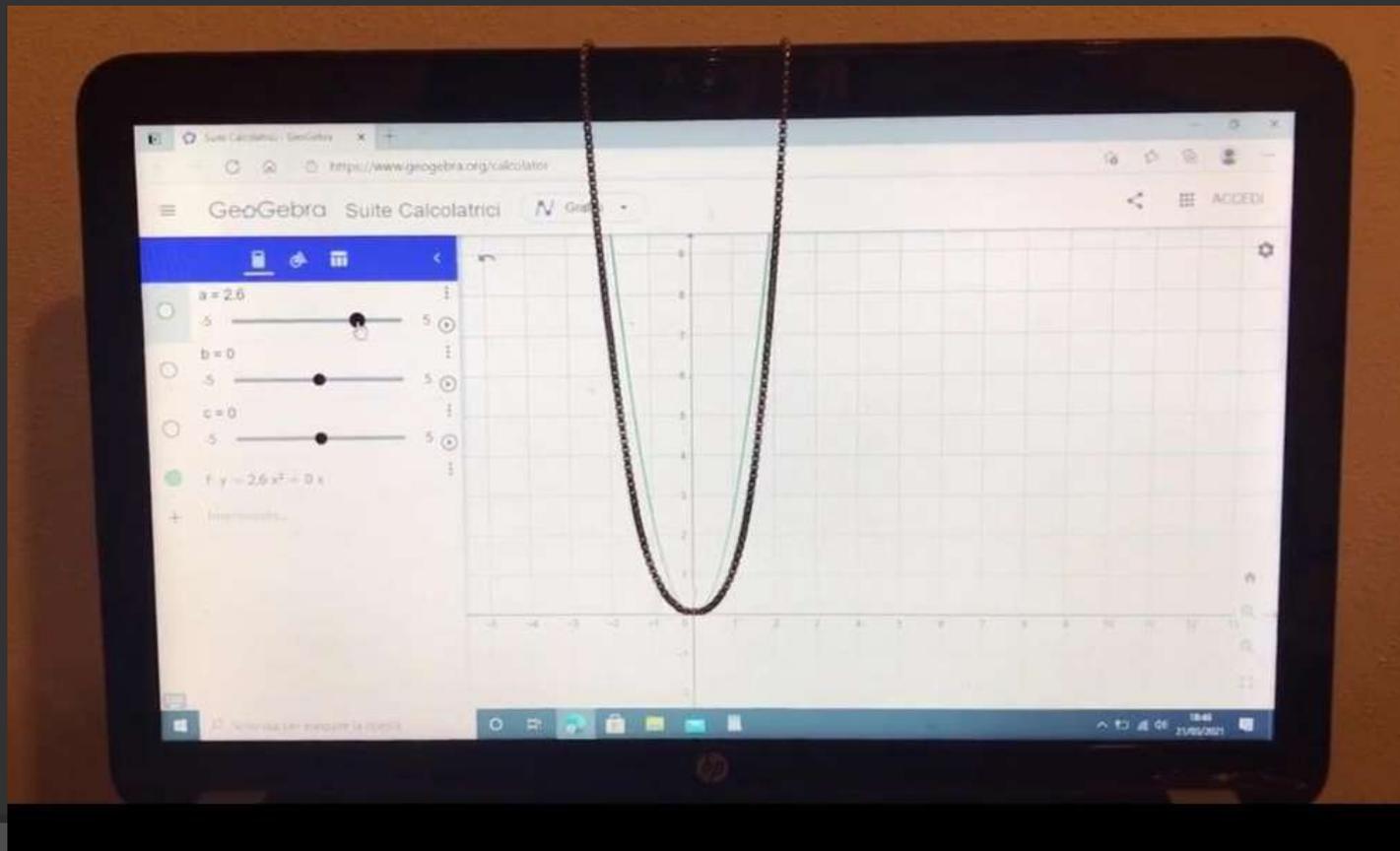
- La traccia è stata fotografata ed inserita come sfondo del piano cartesiano di GeoGebra dopodiché, variando i valori dei coefficienti a, b, c , si è cercata l'equazione della parabola che meglio approssimava la curva ottenuta.



- In un paio di casi la curva non era simmetrica proprio come nel libro di Tartaglia e si è discusso del perché. Tutti hanno inferito correttamente che c'entrava in qualche modo l'attrito e si è discusso su come migliorare le condizioni sperimentali.
- La ripetizione dell'esperienza ha effettivamente fornito una traiettoria parabolica.

La catenaria non è una parabola

Una studentessa ha voluto, ripetendo un'esperienza vista su YouTube, verificare personalmente che la catenaria, pur somigliando a una parabola non è approssimabile con un polinomio di secondo grado. Ponendo una collanina a cavallo del monitor del PC, aperto su GeoGebra, ha cercato, senza trovarla, una curva che si sovrapponesse perfettamente alla collanina.



Le trasformazioni di Galileo

Abbiamo poi approfondito il discorso cercando e trovando quelle relazioni che ci consentono di passare da un sistema di riferimento a un altro e sono note come trasformazioni di Galileo. Si sono proposti esercizi di difficoltà crescente riflettendo ogni volta su quali grandezze cambiavano e quali no mentre a matematica si facevano le trasformazioni. Questi i vari step seguiti che però non approfondiremo in questa sede:

1. Moto di un punto P in due SR relativamente in quiete
2. Posizione di un punto P in due SR relativamente in moto uniforme
3. Posizione di un punto P in moto uniforme in due SR relativamente in moto uniforme
4. Posizione di un punto P in moto uniformemente accelerato in due SR relativamente in moto uniforme
5. Moto di un punto P in quiete in due SR relativamente in moto accelerato
6. Definizione di SR inerziali e non inerziali

Valutazione dell'efficacia del percorso

- Buona parte del percorso è stato fatto in modalità DaD e purtroppo i livelli di attenzione e partecipazione degli studenti non sono stati sempre adeguati. La scelta delle esperienze domestiche è stata accolta molto positivamente dagli studenti e hanno dato modo al docente di effettuare valutazioni su compiti veramente autentici.
- Al termine del percorso, sicuramente positivo, gli studenti hanno acquisito la capacità di legare in maniera logica e strutturata una serie di scoperte, esperimenti e teorie.
- Gli alunni hanno rafforzato la capacità di porsi domande sul significato di un esperimento, sugli obiettivi che ci si prefigge e a distinguere tra fatti e ipotesi.
- Al contempo hanno consolidato fondamentali concetti riguardanti cinematica e dinamica e hanno preso coscienza di cosa si intenda per relatività del moto, un concetto che spesso viene trascurato fintanto non si tratti la relatività ristretta.
- Come riscontrato in altri percorsi di LSS, la metodologia impiegata ha giovato, sia nell'approccio alla materia, sia nei risultati, agli alunni con basi meno solide o con Bisogni Educativi Speciali o di Lingua 2. Gli alunni con un rendimento scolastico medio-alto ma con un approccio nozionistico, dopo un disorientamento iniziale, a quelli dal rendimento medio-alto ma più scolastici, hanno imparato a porsi domande e a modificare in modo sostanziale il loro metodo di studio.

Bibliografia

- ◉ Arons - Guida alla didattica della fisica (Zanichelli)
- ◉ Barreca - La scienza che fu. Idee e strumenti di teorie abbandonate (Editrice Bibliografica)
- ◉ Giordano Bruno - La cena delle ceneri (da Opere Italiane, UTET)
- ◉ Crease - Il prisma e il pendolo. I dieci esperimenti più belli nella storia della scienza (Longanesi)
- ◉ Drake - Galileo Galilei pioniere della scienza (Muzzio)
- ◉ Frova, Marenzana - Parola di Galileo (BUR)
- ◉ Galilei - Discorsi e dimostrazioni matematiche sopra due nuove scienze
- ◉ Galilei - Il saggiaiore. Edizione critica (Antenore)
- ◉ Galilei - Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (BUR)
- ◉ Glynn - La scienza elegante (Dedalo)
- ◉ Heilbron - Galileo. Scienziato e umanista (Einaudi)
- ◉ Koestler - I sonnambuli. Storia delle concezioni dell'universo (Jaca Book)
- ◉ Koyré: Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione (Einaudi)
- ◉ Lombardi - Keplero. Una biografia scientifica (Codice)
- ◉ Zanetti - Gli esperimenti facili: fisica di base (Muzzio)

Sitografia e videografia

- **La parola a Galileo Galilei. Strumenti ed esperimenti galileiani sul moto dei corpi** (Mostra organizzata nel 2012 dall'università di Padova)
<http://divulgazione.fisica.unipd.it/musei-e-mostre/la-parola-a-galileo-galilei-strumenti-ed-esperimenti-galileiani-sul-moto-dei-corpi/>
- **Guidobaldo, Galileo e il lancio della pallina tinta d'inchiostro sulla tettoia inclinata** (di Pietro Cerreta da Atti del XXXIX Convegno Annuale SISFA – Pisa 2019)
<http://www.sisfa.org/pubblicazioni/atti-del-xxxviii-convegno-sisfa-pisa-2019/>
- **Associazione ScienzaViva Calitri, Omaggio a Galilei di Pietro Cerreta** (Congresso SISFA, Firenze 2014)
<http://www.scienzaviva.it/old/pdf/2016/Omaggio%20a%20Galileo.pdf>
- **BEIC Biblioteca Europea di Informazione e Cultura**
https://www.beic.it/project_galileogalilei/index.php
- **Fisicamente.blog di Roberto Renzetti**
<https://fisicamente.blog/2021/04/11/giordano-bruno-3/>
- **Video PSSC sui Sistemi di riferimento**
<https://www.youtube.com/watch?v=DejaKlkaVc0>