

La caduta dei gravi

Partiamo da un semplicissimo fenomeno: solleviamo da terra due oggetti diversi, uno con una mano, uno con l'altra, e teniamoli fermi. Percepriamo un certo sforzo muscolare, diverso per ciascun braccio. Ad un certo punto siamo stanchi, apriamo le dita e lasciamo cadere, nello stesso istante, i due oggetti. Cosa succede?

Molte persone mostrano ancora difficoltà ad acquisire il punto di vista galileo-newtoniano sulla caduta libera mentre persistono concezioni alternative che ancora si rifanno al paradigma aristotelico. La maggior parte degli sforzi fatti per migliorare questo stato di cose profondamente insoddisfacente punta ad insegnare la "verità", cioè il paradigma galileo-newtoniano. Questo compito si scontra con due difficoltà basilari:

- a) il paradigma galileiano era in larga misura differente da quello newtoniano,
- b) quest'ultimo non può essere considerato in alcun modo la "verità" dopo le teorie di Einstein.

Per affrontare nella maniera corretta il problema bisogna procedere per gradi. Il primo gradino è la percezione della "fenomenologia" della "caduta libera" come la più indipendente possibile da interpretazioni teoriche. In condizioni normali, fra due corpi lasciati "liberi" alla medesima altezza, nel medesimo istante, il corpo più pesante raggiunge il suolo per primo, anche se la forma dei due corpi è la medesima. Questo è in contrasto con i moti di corpi celesti: essi sembra che non cadano, ed i loro spostamenti – eccetto che per il sole – sono molto lenti.

La velocità di caduta, in generale, ci impedisce di dare un'analisi sperimentale dettagliata, ma questa fenomenologia è facilmente riprodotta attraverso una simulazione. Dilatando al computer la scala dei tempi, gli eventi diventano facilmente osservabili.

Ripercorriamo la storia della fisica cercando di comprendere le teorie dei principali scienziati che si sono occupati della caduta dei gravi, ovvero Aristotele, Galileo, Newton ed Einstein. Ad essi si devono le teorie scientifiche che hanno maggiormente influenzato la cultura occidentale.

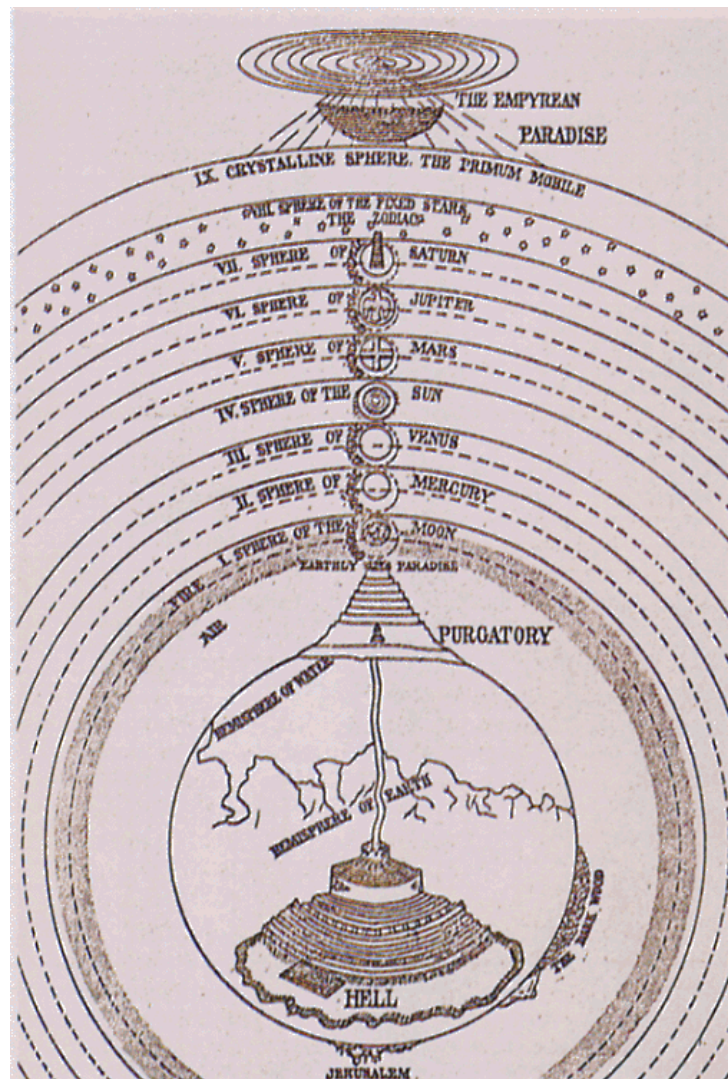
1. Aristotele

«Poiché la natura è principio di movimento e di cambiamento, e la nostra ricerca ha per oggetto la natura, non dobbiamo ignorare che cos'è il movimento. Se ignoriamo questo, infatti, anche la natura rimarrà per noi necessariamente sconosciuta».

(Arist., Phys., III, 1, 200 b 12-15)

Nel mondo di Aristotele la Terra è posta al centro dell'Universo: questa ipotesi era ovviamente corretta dal punto di vista della fenomenologia allora esistente. La

matematica descrive le traiettorie dei corpi cosmici. Al contrario, gli eventi fisici, e le trasformazioni in generale, che avvengono alla superficie della Terra, non possono venire descritti dalla matematica. Solo la struttura perfetta del cielo merita un approccio matematico. Lo spazio non può essere vuoto, né isotropo né omogeneo: ogni corpo tende al suo luogo “naturale”.

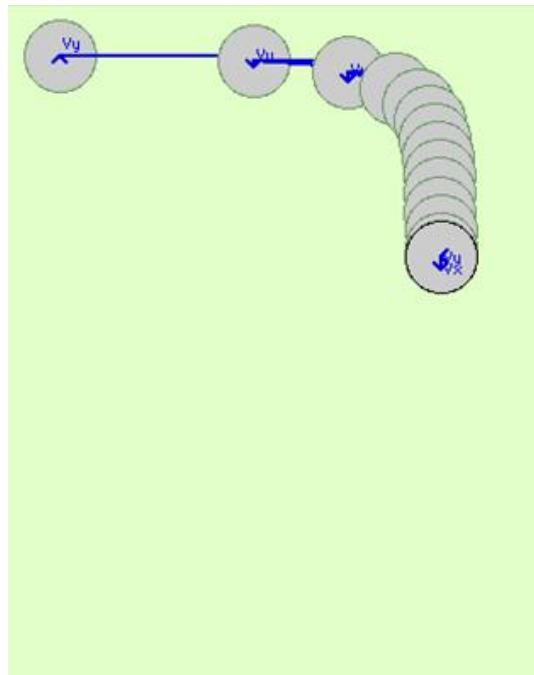


Infatti, i moti “naturali” sono proprio i moti verso i luoghi naturali. Moti “violenti” sono quelli che spostano i corpi dai loro posti naturali. I moti naturali non richiedono nessuna causa; le cause richieste dai moti violenti sono sempre direttamente applicate ai corpi. L’esaurimento di queste cause fa ritornare i corpi al loro posto originale. Tipi differenti di moto non possono esistere contemporaneamente in un medesimo corpo.

Noi potremmo considerare il moto di una freccia dal punto di vista di Aristotele: essa si muove perché la forza dell’arco è trasmessa all’aria, che continua a spingere la

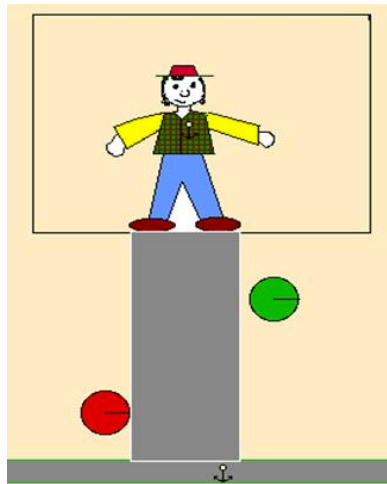
freccia fino al completo esaurimento della forza. A questo punto la freccia comincia a cadere, per raggiungere il suo luogo naturale.

I due moti sono successivi: concetti come “somma di velocità” non esistono nella fisica di Aristotele. Ciò è coerente con la sua idea generale: un’operazione matematica non potrebbe essere applicata ad eventi fisici. La traiettoria completa della freccia è più prossima ad un angolo retto che non ad una parabola.



Aristotele utilizzò il concetto di orrore del vuoto per spiegare come una freccia si mantenga in moto una volta che questa abbia lasciato l'arco dalla quale è stata scoccata.

Aristotele riteneva, infatti, che per mantenere in moto un oggetto fosse necessaria l'applicazione continua di una forza. Secondo Aristotele una freccia in movimento creava una sorta di vuoto dietro di sé e l'aria che si precipitava a riempirlo spingeva la freccia in avanti.



Aristotele affermava che corpi differenti cadono con velocità differenti: la velocità dipende dal loro peso. Maggiore è il peso, maggiore è la velocità di caduta. Questa affermazione è coerente col fenomeno realmente osservato, e, al presente, è diffusa fra la maggior parte della gente esistente al mondo. È abbastanza “naturale” ritenere che i corpi non possano muoversi senza il contatto con una forza (tentate di spingere una vettura rimasta senza benzina!) e che i corpi più pesanti cadano con velocità maggiore.

Aristotele ritenne che la velocità (V) di un corpo che cade per il moto naturale fosse proporzionale alla forza del peso (P) ed inversamente proporzionale alla resistenza del mezzo più o meno denso (D) in cui il corpo si muove; era quindi convinto che più un corpo è pesante più la sua caduta, libera da violenza, risulta rapida.

Da qui l'equazione del moto: $V = P/D$ (moto naturale).

L'approccio di Aristotele sembra infatti funzionare in modo eccellente in molti casi: se la differenza fra la densità del corpo in caduta e la densità del mezzo in cui cade è piccola, il peso pare effettivamente legato alla velocità di caduta.

Per Aristotele il movimento è un processo, un cambiamento, pertanto può persistere solo se persiste la causa. Come si spiega allora il fatto che un proiettile continua a muoversi anche dopo la separazione dal suo “motore”? La spiegazione che prova a darne coinvolgendo il mezzo, l'aria o l'acqua, in cui il corpo si muove è artificiosa e presenta vari punti deboli che non potevano sfuggire agli avversari come ai seguaci della filosofia aristotelica.

Le teorie di Aristotele durarono molti secoli, anche se subirono alcune modifiche durante il Medio Evo. Richiamiamo qui due interessanti contributi: **la teoria dell'“impeto”** ed il **“teorema della media”**.

La **teoria dell'“impeto”** afferma che un corpo può muoversi anche per cause interne: l'“impeto”, immagazzinato all'interno del corpo, consente al corpo di muoversi da solo dopo l'azione diretta di una forza. Questa teoria fu proposta da Giovanni Philoponos nel VI secolo d.C. e fatta propria tra gli altri da Giovanni

Buridano, Nicola Oresme, Leonardo da Vinci, Giambattista Benedetti e Galileo Galilei.

Il "**teorema della media**" afferma che lo spazio percorso da un corpo in moto con accelerazione uniforme è uguale allo spazio percorso da un corpo in moto con una velocità uniforme che sia la media fra le velocità agli estremi (all'inizio ed alla fine) dell'altro moto accelerato. Al presente noi consideriamo questo teorema come un risultato importante, riguardante ogni moto uniformemente accelerato, e, in particolare, la caduta dei corpi: noi lo riferiamo alla legge del quadrato dei tempi nei moti accelerati. Nondimeno, per filosofi e logici, viventi nel XIV secolo, il teorema non riguardava i fenomeni empirici ma solo quantità e qualità astratte.

2. Galilei

Saltiamo ora secoli di storia e trattiamo del modello di Galilei. Consideriamo innanzitutto il moto del pendolo: esso, di fatto, oscilla continuamente ma, dopo alcune oscillazioni non raggiunge più l'altezza originaria. Solo in astratto il pendolo potrebbe mantenere la medesima altezza: questa idealizzazione è appunto il pendolo di Galilei. Seguendo Galilei, un pendolo reale è un pendolo ideale che risente di effetti di disturbo: attriti, resistenza dell'aria.

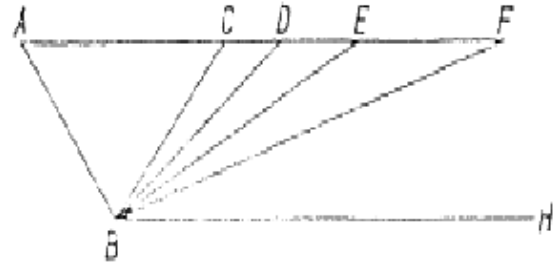
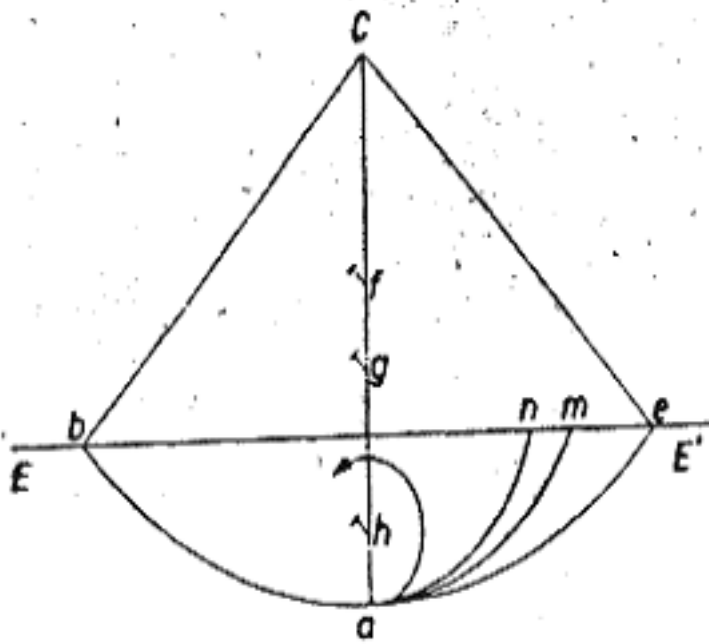
La verità fisica sta al di là della pura fenomenologia. Questo fondamentale espediente metodologico e concettuale può essere facilmente mostrato per mezzo di una simulazione al computer, che ci permette di aggiungere, o rimuovere, questi effetti perturbativi.

L'idealizzazione dei moti, che cozza contro le concezioni di Aristotele, caratterizza la nascita della fisica occidentale moderna. Galileo adotta una nuova metodologia:

- a) descrive "come" avviene il moto dei corpi senza spiegarne il "perché",
- b) utilizza la matematica e non solo la logica,
- c) compie sofisticati esperimenti e non solo osservazioni,
- d) sostiene una nuova concezione astronomica che considera il Sole fermo e la Terra in moto.

Egli afferma inoltre l'importanza delle verità scientifiche accanto a quelle religiose. Le novità da lui introdotte furono ritenute pericolose dalla Chiesa, che in un drammatico processo lo condannò.

Tornando al pendolo, Galileo comprese che la velocità guadagnata nella caduta consentiva al pendolo di risalire a quasi la medesima altezza. Egli considerò l'altezza più importante della traiettoria: concentrarsi sulle posizioni iniziale e finale piuttosto che sulle traiettorie è la grande conquista di Galileo. Qual è la relazione – egli si chiese – fra altezza e velocità? Per risolvere la questione, Galileo considerò il moto di un corpo lungo un'asta inclinata, disposta a diverse inclinazioni rispetto al piano orizzontale.



Analogia tra i moti forzati del pendolo ed i moti lungo piani inclinati

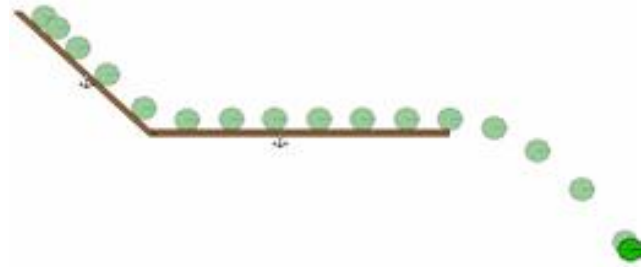
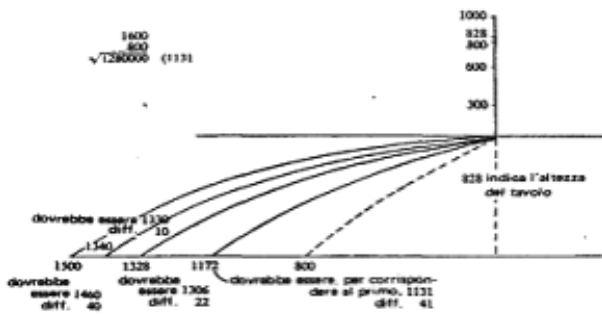
Egli fece molti esperimenti con grande cura, seguendo due ipotesi principali che cozzavano contro sia il senso comune sia la fisica di Aristotele:

- a) la velocità dipende solo dall'altezza e non dalla traiettoria;
- b) velocità ed intervallo di tempo non dipendono dal peso.

In un "vero" caso ideale, dopo essersi sbarazzati di ogni genere di attriti, i corpi cadono con la medesima accelerazione, nel medesimo tempo. Nella caduta libera egli scoprì che la velocità non è direttamente proporzionale allo spazio coperto dal corpo, ma proporzionale all'intervallo di tempo trascorso. Egli espresse questa legge di "caduta" in tre modi:

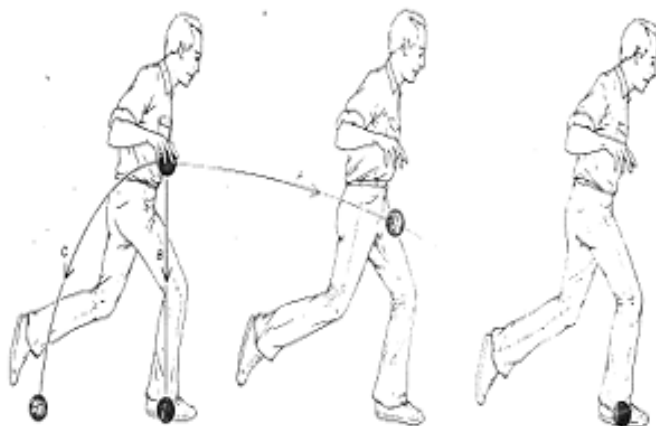
- a) l'antico, poi dimenticato, teorema della "velocità media",
- b) la legge che stabilisce che spazi successivamente coperti nell'unità di tempo, durante il moto accelerato, sono proporzionali alla successione di numeri dispari,
- c) la legge che stabilisce che lo spazio coperto è proporzionale al quadrato del tempo trascorso.

Ulteriori risultati in cinematica sono dovuti a Galilei. Indagando su problemi militari riguardanti la traiettoria delle palle di cannone egli comprese che il moto del proiettile è la sovrapposizione simultanea di due moti: un moto orizzontale uniforme ed un moto verticale accelerato, corrispondente alla caduta libera. Questa sovrapposizione produce una traiettoria parabolica.



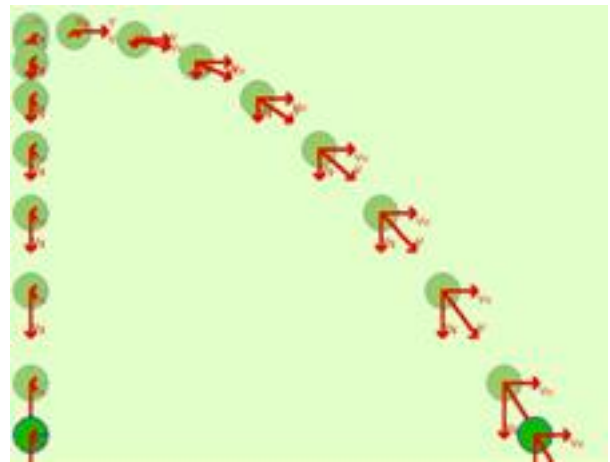
Altre pietre miliari della fisica aristotelica caddero sotto la critica di Galilei. Contro la proporzionalità, di Aristotele, fra forza e velocità, Galilei affermò che un corpo può mantenere il suo moto uniforme in assenza di qualsiasi genere di forze. Se il corpo si arrestasse, ciò sarebbe dovuto ad altre forze che rallentano il corpo: attualmente noi citiamo questa affermazione come “**Principio d’inerzia**”. I testi di fisica scrivono: un corpo mantiene il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme finché una forza non modifichi questo stato. Dobbiamo sottolineare che non siamo sicuri se Galilei intendesse esattamente il “nostro” Principio d’inerzia quando parlava di moto in assenza di forze. Gli studiosi sono in dubbio: Galilei si riferì proprio al nostro moto “rettilineo” uniforme oppure ad un moto uniforme più generale? A differenza dell’antica fisica, nella fisica di Galileo il moto, invece della quiete, sembra essere il principale carattere “naturale” del “racconto” fisico.

Insieme al Principio d’inerzia, negli ultimi libri di Galileo noi troviamo il cosiddetto “**Principio di Relatività**”. Il contenuto di questo principio è: le leggi della fisica, come pure i risultati degli esperimenti, non dipendono dallo stato di moto rettilineo uniforme del laboratorio. Galileo suggerisce che dovremmo fare esperimenti sotto la coperta di una nave: fra questi, egli descrisse alcuni esperimenti sulla caduta dei corpi. Se la nave è ferma in porto o viaggia uniformemente in mare, gli oggetti cadono lungo una linea verticale. Se non ci fosse possibile dare un’occhiata fuori dalla nave, come potremmo renderci conto se siamo in movimento oppure no? Naturalmente, dovremmo ricordare che gli stessi dubbi sul moto “uniforme” affliggono il principio relatività, come pure il principio d’inerzia, di Galileo.



BALL DROPPED by a running person continues to move forward at the same speed as the runner. The forward motion combines with a steadily accelerating downward motion to produce a parabolic trajectory (c). Intuitive beliefs about the motion of objects do not always correspond with physical reality. The author and his colleagues

asked college students where a ball would land if it were dropped by a walking person. Only 45 percent of the students knew the ball would travel forward as it fell. Forty-nine percent thought the ball would fall straight down and land directly under the point where it was released (b). 6 percent thought the ball would move backward as it fell (a).



[14A]

3. Newton

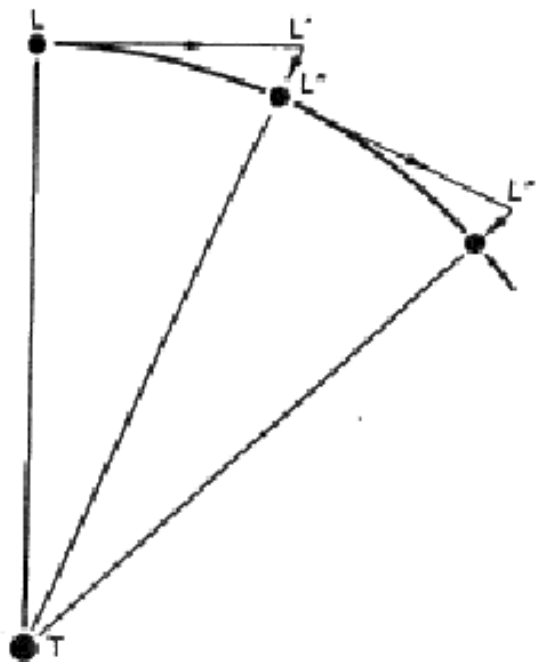
Nel 1642, nello stesso anno in cui muore Galilei, nasce in Inghilterra Isaac Newton, uno scienziato la cui fama sarà almeno uguale a quella del grande italiano. Newton dà un gran contributo sia alla Meccanica sia all'Ottica e dà origine a due diverse tradizioni scientifiche: una maggiormente matematizzata (meccanica razionale, astronomia, idrodinamica) ed una prevalentemente sperimentale (ottica, elettricità, magnetismo, termologia).

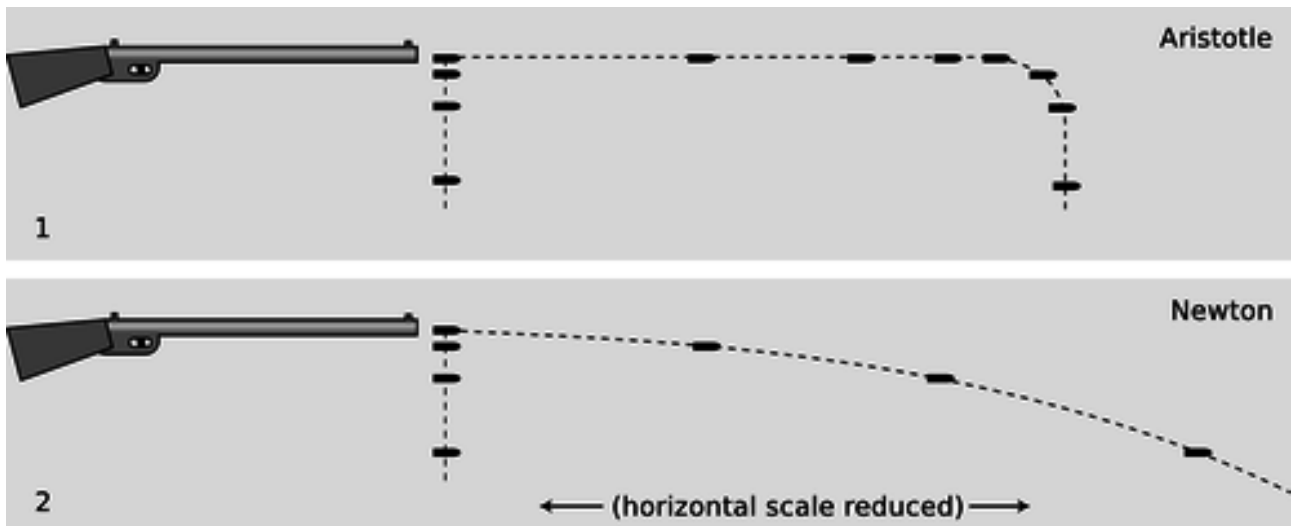
In meccanica Newton riprende i problemi studiati da Galileo, e li affronta in una nuova prospettiva: non vuole solo descrivere i moti ma vuole studiare le cause di questi stessi moti. Particolare attenzione è quindi dedicata allo studio delle forze che modificano lo stato di quiete o di moto dei corpi. Per Newton tutte le traiettorie sono il risultato di due forze contrapposte: la *vis insita* che tende a conservare lo stato di moto di un corpo e la *vis impressa* che tende invece a modificarlo. Newton mutua da Galileo il principio d'inerzia e lo trasforma nel primo assioma della sua meccanica. Si afferma quindi l'idea che lo stato naturale dei corpi sia il moto: i corpi possono essere in moto anche senza che su di essi agiscano delle forze. Entra a far parte della meccanica newtoniana anche un altro contributo di Galilei, strettamente legato al principio d'inerzia: il principio di relatività. La concezione dello spazio e del tempo è invece nuova. Da un'approfondita analisi del principio di inerzia, derivava infatti, paradossalmente, un'esigenza che contrastava con il principio di relatività: avere un riferimento certo per l'attribuzione della quiete o del moto ai corpi. Newton assume che lo spazio ed il tempo siano assoluti, immutabili, eterni, infiniti, indipendenti da ogni oggetto materiale. Il secondo assioma di Newton ci fornisce una definizione del concetto di forza: in questa nuova concezione, le forze non sono più legate alla

velocità dei corpi, come era in Aristotele, ma alla variazione della velocità, cioè l'accelerazione.

Proseguendo nella sua geniale costruzione, Newton elabora le leggi di Keplero e perviene alla legge della gravitazione universale, che unifica il moto dei corpi celesti con la caduta dei gravi sulla Terra. La legge di caduta di Galileo viene inquadrata da Newton in un contesto più ampio: tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione perché subiscono due effetti contrapposti che si compensano. Da una parte c'è la forza di gravità, che è proporzionale alla massa (gravitazionale) del corpo, dall'altra la forza di inerzia che pure è proporzionale alla massa (inerziale) del corpo. La massa inerziale e quella gravitazionale sono uguali e quindi i corpi pesanti, se da una parte sono attirati maggiormente dalla Terra, dall'altra resistono maggiormente al tentativo di modificare il proprio stato.

Il moto dei satelliti offre un'illustrazione delle idee di Newton: la traiettoria della Luna viene vista come una perenne caduta verso la Terra, associata ad una forza inerziale tangenziale. Nell'ambito delle proprie concezioni Newton riuscì anche ad ipotizzare la messa in orbita di satelliti artificiali. Quindi, per Newton, il termine "caduta" viene assimilato nel concetto di "attrazione gravitazionale", acquistando un significato più generale: "cadono" i frutti dagli alberi così come "cade" la Luna intorno alla Terra.

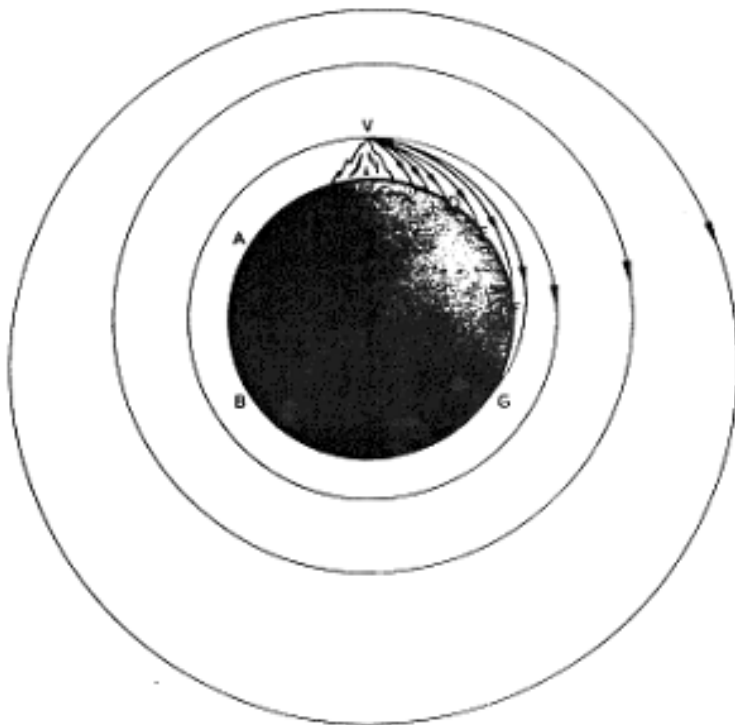




Un proiettile è sparato da un fucile mentre un altro proiettile è lasciato cadere simultaneamente dalla stessa altezza.

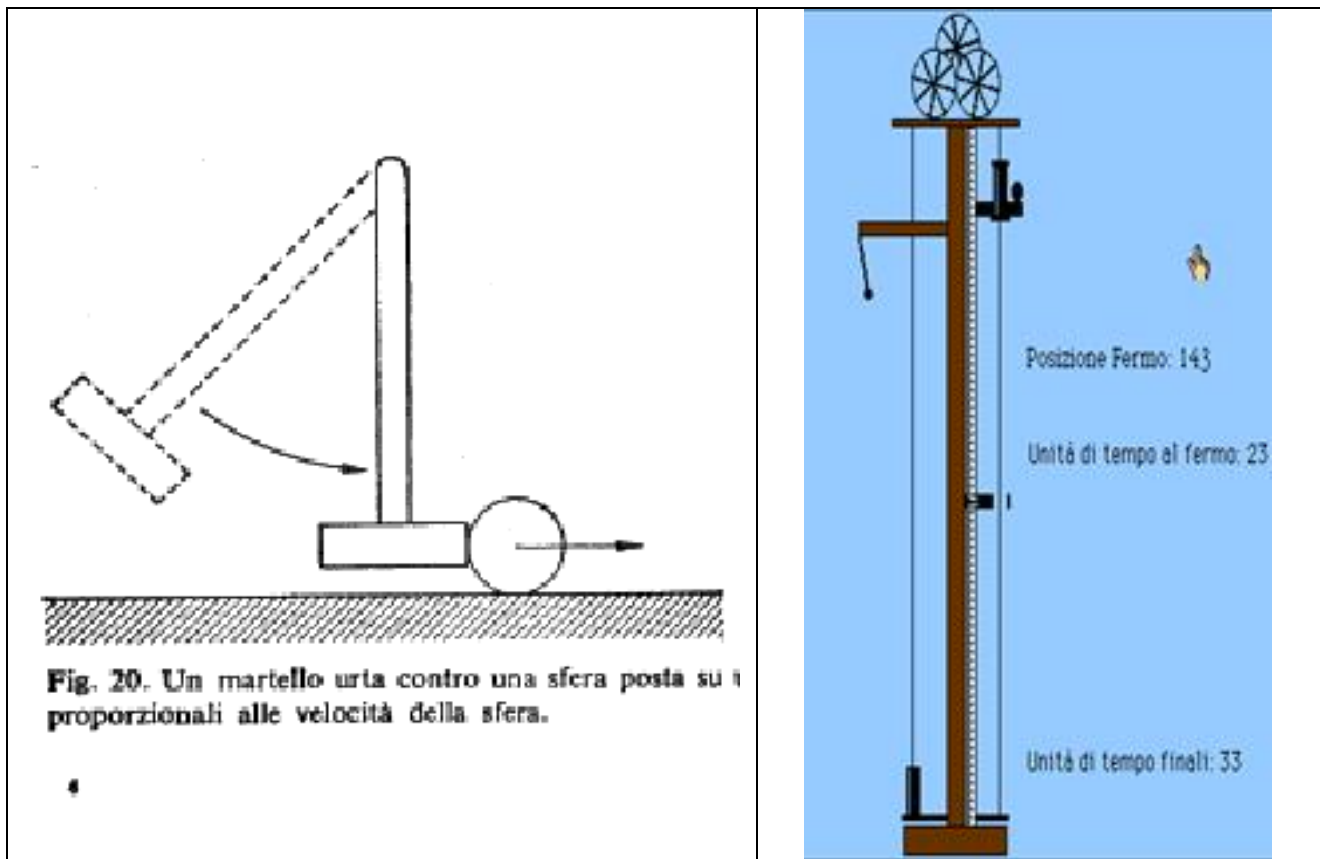
La fisica aristotelica afferma che il moto orizzontale del proiettile sparato ritarda l'inizio della caduta per cui il proiettile lasciato cadere raggiunge per primo il suolo.

La fisica newtoniana afferma che i due proiettili hanno lo stesso moto verticale, a prescindere dai loro diversi moti orizzontali.



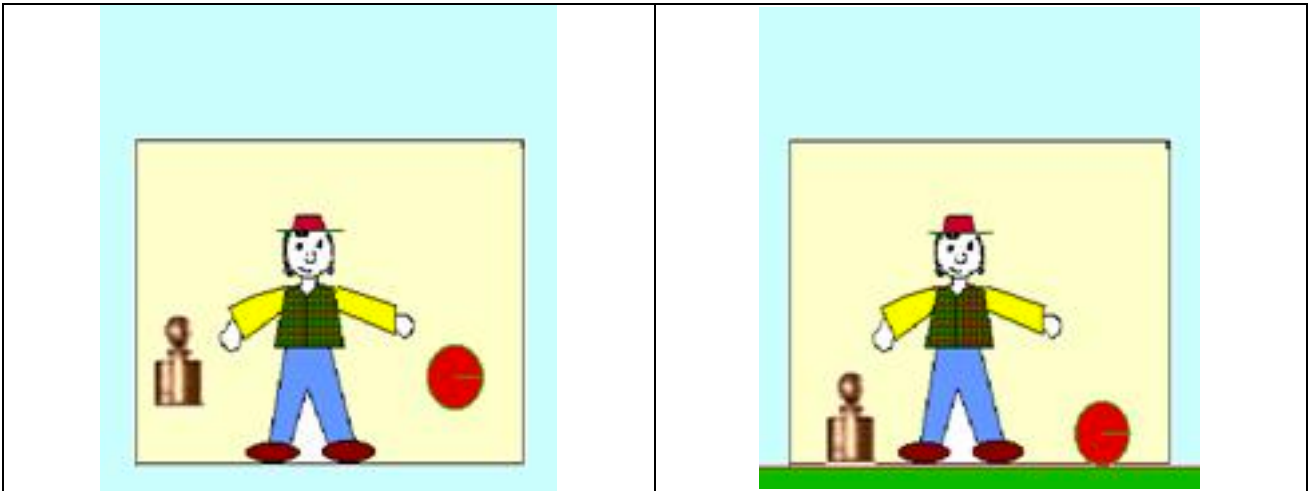
Un cannone, posto in vetta ad una montagna, spara un proiettile con velocità sempre maggiore. Se la prima traiettoria è un breve ramo di parabola, le traiettorie successive sono rami sempre più lunghi finché la traiettoria diventa un'ellisse attorno alla Terra. Il proiettile è divenuto un satellite.

Nel caso semplice di un singolo corpo in vicinanza della superficie terrestre, la massa inerziale uguaglia quella gravitazionale, ma, in sistemi più complessi, la parte di sistema corrispondente alla massa inerziale potrebbe essere diversa dalla parte corrispondente alla massa gravitazionale, come mostra la macchina di Atwood.



4. Einstein

Quando, nel 1905, Einstein enunciò la teoria a noi nota come “Relatività Ristretta”, l’elettromagnetismo di Maxwell venne messo alla base della fisica e la meccanica di Newton venne modificata. Nel corso degli anni, numerose predizioni della teoria si sono rivelate esatte. In particolare, la relazione che stabilisce l'equivalenza tra massa ed energia è diventata un simbolo della nostra epoca. Ma questa legge pose un serio problema allo stesso Einstein: se l’inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia, per corpi in moto viene a cadere l’uguaglianza tra massa inerziale e gravitazionale: questo è in contrasto con la legge della caduta dei gravi. Einstein, sulla base delle esperienze di Eötvös, trasformò in principio l’identità tra massa inerziale e gravitazionale. Un brillante esperimento mentale lo portò ad affermare, nel 1907, il principio di equivalenza: le esperienze fatte in una cabina chiusa non ci possono far capire se siamo in un sistema inerziale sottoposto a un campo gravitazionale oppure in un sistema non inerziale. Proponiamo due possibili situazioni per un osservatore collocato in una cabina, compagnia di due oggetti. Nel primo caso, gli oggetti “non pesano”: è l’effetto di una caduta libera in un campo gravitazionale oppure è l’effetto di un moto inerziale in uno spazio “vuoto”? Nel secondo caso, gli oggetti “pesano” e cadono sul pavimento: è l’effetto gravitazionale del pianeta sul quale essi sono collocati oppure è l’effetto di una accelerazione “verso l’alto, nello spazio vuoto”?



Il principio di equivalenza ci porta a riconsiderare il concetto di tempo e di spazio: lo scorrere dei tempi e la misura delle lunghezze dipende non solo dal moto, come nella Relatività Ristretta, ma anche dalla posizione relativa dei corpi. Nel 1916 Einstein pubblicò la Teoria Generale della Relatività ove si affermava questa nuova concezione dello spazio e del tempo: non più uno spazio-tempo vuoto, ma uno spazio-tempo relazionale, le cui proprietà dipendono proprio dalla presenza delle masse. Anche la geometria che descrive il mondo fisico viene cambiata: Einstein adotta una geometria non euclidea, più adatta a descrivere uno spazio-tempo che si “incurva” in presenza di grandi masse. Non ci sono più forze che fanno deviare i corpi dalle loro traiettorie rettilinee inerziali, ma curvature dello spazio tempo che dipendono dalle masse. La “caduta” dei corpi assume un nuovo significato: è la traiettoria “naturale” in questo spazio curvo. La teoria di Einstein ebbe subito grande successo per la sua grande bellezza ed eleganza formale, anche se le corroborazioni sperimentali, all'inizio, non furono particolarmente numerose: tra queste ricordiamo l'incurvamento dei raggi di luce nelle vicinanze del sole.

Zusch. Nr. 5. 13.

Handwritten: Sehr geehrter Herr Kollege!

Handwritten: Eine einfache theoretische Her-
leitung macht die Annahme plausibel,
dass Lichtstrahlen in einem Gravitations-
feld eine Dispersion erfahren
gen. rel.

Diagram: A horizontal line with a vertical line intersecting it, and a small circle below the intersection.

Handwritten: Am Sonnenrande müsste diese Ablenkung
0,84" betragen und wie in abweichender
(Richtungsänderung) abgelesen werden
kann.

Handwritten: Es wäre deshalb von großem
Interesse, Sie für eine große Sonnen-
mitte gerichtete Finsternis bei Anwendung
der stärksten Vergrößerungen bei Tage
(ohne Sonnenfleckchen) gesehen werden
können.

Handwritten: Auf dem Kart meines Kollegen, H. Wenz
Prof. Maurer bitte ich Sie deshalb,
mir mitzuteilen, was Sie nach Ihren
reichen Erfahrung in diesen Dingen
für mit dem heutigen Mittel
erreichbar halten.

Handwritten: Mit aller Hochachtung
Ihr ganz ergebener
A. Einstein

Handwritten: Technische Hochschule
Zürich.

Handwritten: Dear Sir,
Thank you much for a friendly reply
to the paper of Eddington, by the
College of the Polytechnic School.

Handwritten: Yours truly
A. Einstein

Stamp: A circular stamp with text around the perimeter and a central emblem.

Handwritten: 14. X. 13

Qual è la fine della storia?

Questa nostra “storia” della caduta dei gravi termina con Einstein ma, in realtà, essa non ha fine. Altri protagonisti, in futuro, potrebbero aggiungersi: non esiste né un finale trionfale né una verità ultima. La storia della fisica ci offre un palcoscenico sul quale osserviamo diverse rappresentazioni del mondo. Comprendere e confrontare queste diverse rappresentazioni è un modo non banale di apprendere la fisica e comprendere qualcosa del mondo in cui viviamo. Abbiamo, di fronte a noi, quattro differenti punti di vista dai quali considerare il moto di frecce, proiettili, satelliti e raggi di luce. Sebbene le diverse rappresentazioni non possano ritenersi, in senso stretto, “equivalenti”, possiamo dire che, delimitando opportunamente il dominio di applicazione, esse sono “buone” spiegazioni.

Aristotele	"spazio relazionale" sistema geocentrico forze agenti per contatto velocità proporz. al peso
Galilei	matematica ed esperimento sistema eliocentrico moti composti Principio d'inerzia e Principio di relatività legge del moto accelerato
Newton	spazio assoluto “vis insita” & “vis impressa” Legge di gravitazione universale caduta dei corpi = satelliti
Einstein	geometrizzazione della fisica la massa è energia Principio di equivalenza incurvamento dei raggi di luce