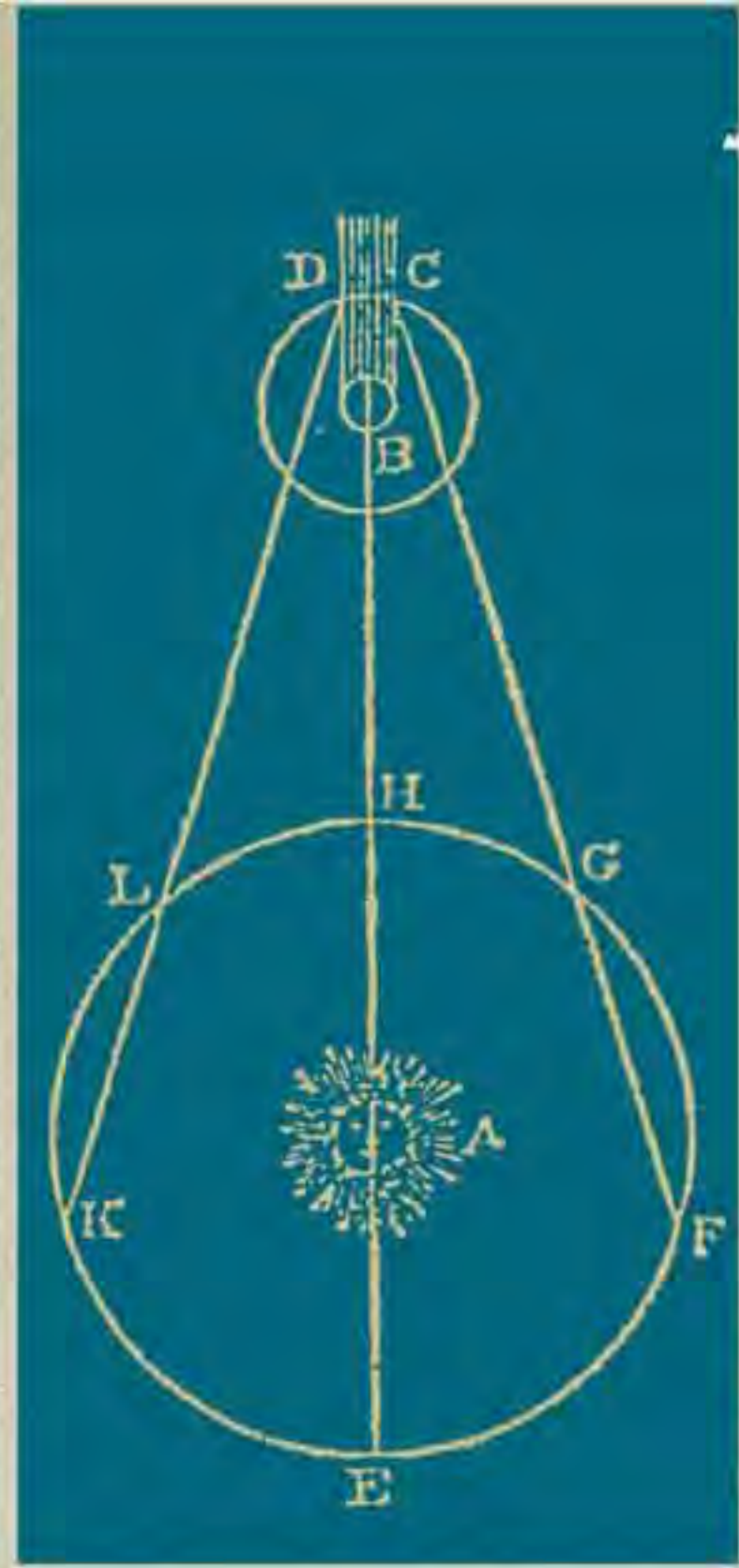


Galileo
converge con la
Matematica,
l'Optica e
l'Astronomia



La misura di
L_{Römer}.
A Sole, B Giove,
D e C posizioni
di Io, EFGHK
posizioni della
Terra

Misura

L'osservazione scientifica esclude le percezioni qualitative dei sensi e arriva a quantificare le caratteristiche osservate attraverso il processo **teorico-pratico** della misura.

È emblematico il modo con cui è stato affrontato (da Galileo) e risolto (in seguito) il problema della misura della **velocità della luce**.

Il problema

La velocità con cui la luce si propaga è **finita o infinita**?

Salviati: ... onde io non saprei intendere che l'azione della luce, benché purissima, potesse essere senza moto, ed anco velocissimo.

Sagredo: Ma quale e quanta doviamo noi stimare che sia questa velocità del lume? Forse istantanea, momentanea, o pur, come gli altri movimenti, temporanea? Né potremo con esperienza assicurarci qual ella sia?

Salviati-Galileo descrive un possibile esperimento per ottenere tale misura: due giovani, posti su due colline a due o tre miglia di distanza, alternativamente coprono e scoprono una lanterna e misurano la velocità come rapporto tra il doppio della distanza e l'intervallo di tempo misurato dal primo giovane. Dice anche di aver provato a misurarla ma su distanze troppo piccole per avere dati significativi.

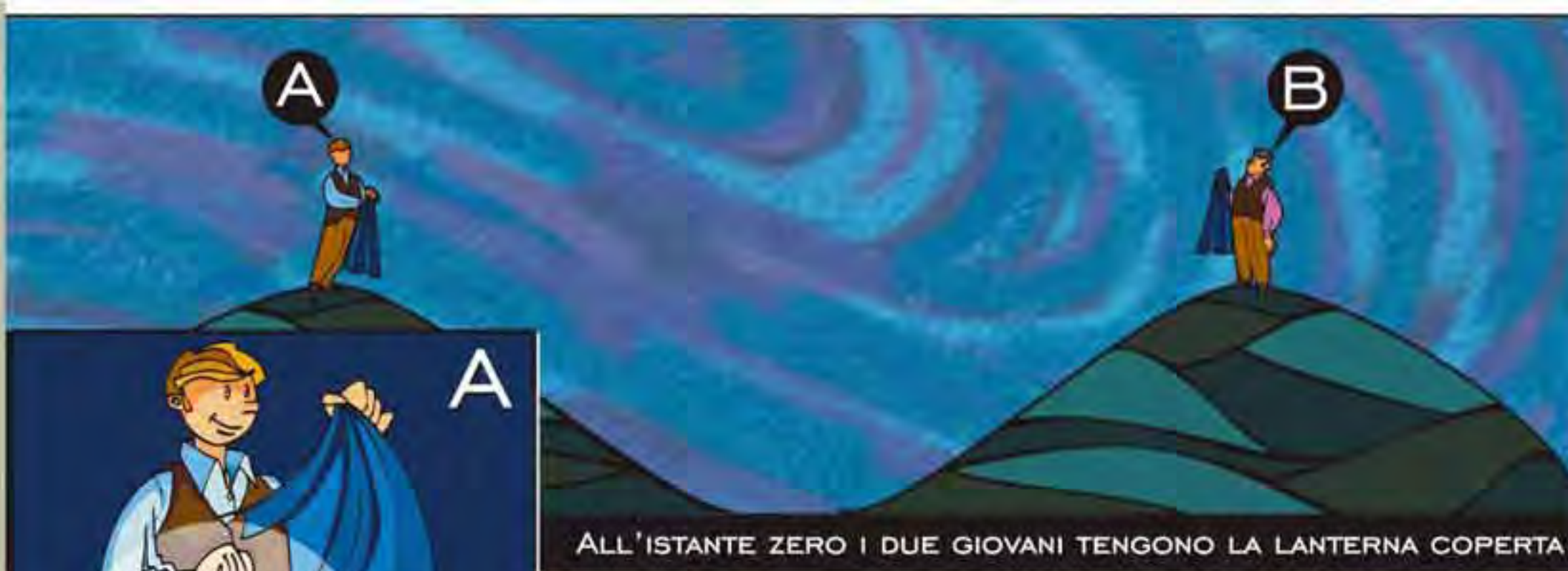
Sagredo: L'esperienza mi pare d'invenzione non men sicura che ingegnosa.

Salviati: Veramente non l'ho sperimentata, salvo che in lontananza piccola, cioè manco d'un miglio, dal che non ho potuto assicurarmi se veramente la comparsa del lume opposto sia istantanea; ma ben, se non istantanea, velocissima, e direi momentanea, è ella, e per ora l'assomiglierei a quel moto che veggiamo farsi dallo splendore del baleno veduto tra le nugole lontane otto o dieci miglia...

La soluzione

Nel 1675 il danese **Ole Römer** determinò la velocità della luce con un metodo basato su misure astronomiche ma con una forte analogia con il procedimento suggerito da Galileo: il passaggio dalle colline di Firenze agli spazi interplanetari consentiva di ottenere misure finite. Qui il ruolo della lanterna era giocato dal satellite gioviano Io (uno dei quattro astri medicei) e la distanza tra le due colline diventava quella tra Giove e la Terra.

Misure di tipo ottico più recenti, sempre in analogia col modello galileiano, furono compiute dai fisici francesi **Louis Fizeau** (1849) e **Léon Foucault** (1850), ottenendo valori prossimi ai 300.000 km/s



Libera schematizzazione dell'esperimento ideale suggerito da Galileo per misurare la velocità della luce



ALL'ISTANTE t_1 A SCOPRE LA LANTERNA

ALL'ISTANTE ZERO I DUE GIOVANI TENGONO LA LANTERNA COPERTA

Salviati-Galileo



ALL'ISTANTE t_2 B RICEVE IL SEGNALE



ALL'ISTANTE $(t_2 + R)$, DOVE R È IL TEMPO DI REAZIONE DI B, B SCOPRE LA LANTERNA E IL SEGNALE PARTE VERSO A

Il tempo necessario alla luce per andare da A a B e tornare in A è $(t_3 - t_1 - R)$

La velocità del segnale è $2 AB / (t_3 - t_1 - R)$



ALL'ISTANTE t_3 IL SEGNALE RITORNA AD A CHE TIENE LA LANTERNA COPERTA

Misuratore

Ma la misura del tempo $(t_3 - t_1 - R)$ dà sempre come risultato zero, lasciando irrisolto il dubbio galileiano sulla finitezza o meno della velocità della luce

Una edizione dello studio sul Compasso geometrico militare



Particolare del frontespizio de *Il Saggiatore*

Una pagina del trattato di Galileo

Matematicizzare la scienza

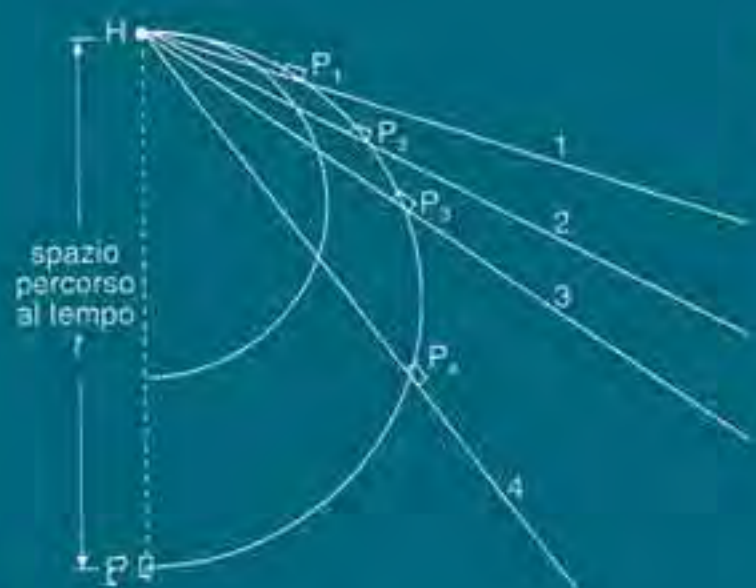
A Galileo è dovuto quello che oggi potremmo chiamare il codice della fisica moderna per quanto riguarda il **linguaggio**.

Il manifesto del programma galileiano di matematizzazione della scienza è riportato nella famosissima pagina de *Il Saggiatore*:

La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'Universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri sono triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.

Galileo attribuisce dunque alla matematica il ruolo di linguaggio della filosofia della natura in quanto fornisce gli strumenti concettuali per le dimostrazioni certe; ma le elaborazioni teoriche galileiane restano esclusivamente nell'ambito della *geometria euclidea*; potremmo dire che i suoi procedimenti dimostrativi si sviluppano con **squadra e compasso!**





Il moto su piani inclinati di diversa inclinazione

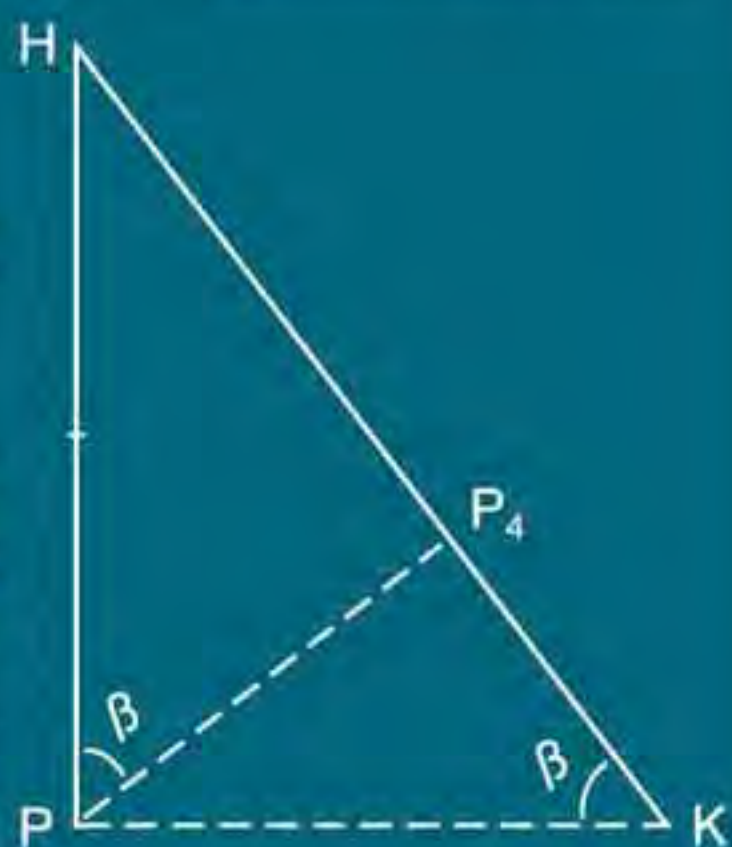
Si considerano più piani con diversa inclinazione (1, 2, 3, ...); se a un dato istante, su ciascun piano si fa scendere un grave, a ogni istante successivo le posizioni dei gravi sui piani inclinati, P_1, P_2, P_3, \dots coincidono con le intersezioni dei piani con una particolare circonferenza così costruita: il diametro è dato dal segmento che ha come estremi il punto H , comune ai piani, e il punto P che rappresenta la posizione assunta nello stesso istante da un grave che cade lungo la verticale contemporaneamente agli altri gravi.

Dimostriamo con *linguaggio* moderno che, accanto alle proprietà geometriche dei triangoli e delle circonferenze, utilizza la formulazione delle leggi del moto uniformemente accelerato in termini algebrici.

Consideriamo un solo piano inclinato per i punti H e P , riportato in figura con la semicirconferenza di diametro HP .

Si ha $HP = g t^2 / 2$. Nel medesimo tempo $t = \sqrt{2HP / g}$ il grave percorre lungo il piano inclinato il tratto $l = g (\sin \beta) t^2 / 2$. In base all'assunto che si sta considerando deve essere l uguale a HP .

Infatti i triangoli HP, P e KP, P sono simili e quindi sono uguali gli angoli \widehat{HPP} e \widehat{PKP} , entrambi di valore β , pertanto essendo $\sin \beta = HP / HP$, risulta $l = HP$.



Due dimostrazioni nello stile galileiano

GALILEO E LA CONOSCENZA

Il moto naturalmente accelerato

Salviati: Quando, dunque, osservo che una pietra, che discende dall'alto a partire dalla quiete, acquista via via nuovi incrementi di velocità, perché non dovrei credere che tali aumenti avvengono secondo la più semplice e più ovvia proporzione? Ora se consideriamo attentamente la cosa, non troveremo nessun aumento o incremento più semplice di quello che aumenta sempre nel medesimo modo. [...] Possiamo quindi ammettere la seguente definizione del moto di cui tratteremo: Moto equabilmente, ossia uniformemente accelerato, dico quello che a partire dalla quiete, in tempi eguali acquista eguali momenti di velocità.

Nello studio del moto *naturalmente* accelerato Galileo è guidato dall'osservazione sperimentale secondo la quale gli spostamenti sono direttamente proporzionali ai quadrati degli intervalli di tempo impiegati a percorrerli. Egli **cerca di darne una dimostrazione teorica** soprattutto nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, ma il tentativo di darne una giustificazione in termini rigorosamente geometrici fallisce.

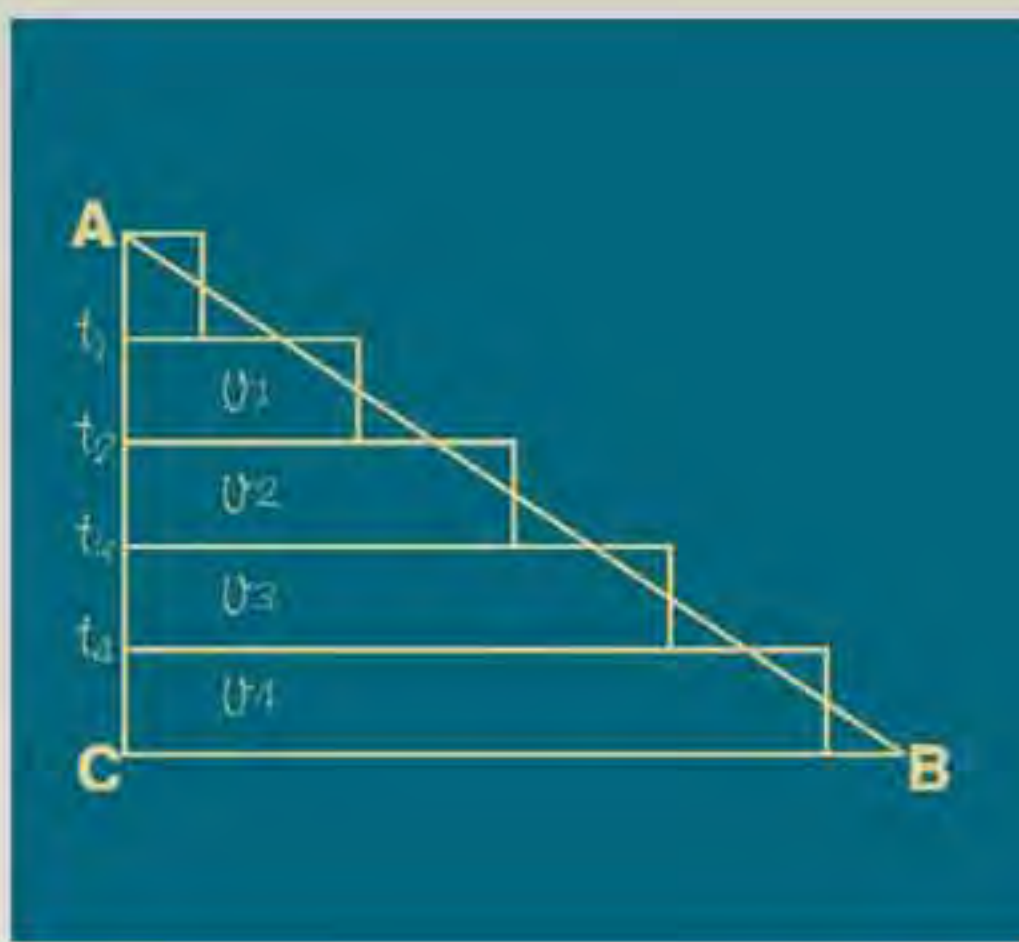
Reinterpretazione del procedimento galileiano

I segmenti tracciati sulla verticale denotano i tempi; i segmenti orizzontali, dalla retta verticale all'obliqua, indicano le velocità v_n al tempo corrispondente t_n .

Lo spazio percorso tra il tempo t_n e il tempo t_{n+1} è dato dall'area del rettangolo di altezza $(t_{n+1} - t_n)$ e di base $(v_{n+1} + v_n) / 2$.

Sottintendendo che le velocità sono direttamente proporzionali ai tempi, si deduce la proporzionalità diretta tra spazi percorsi e quadrati dei tempi.

Le difficoltà incontrate da Galileo nel dare una dimostrazione coerente nasce dal fatto che, pur essendosi avvicinato intuitivamente al concetto di velocità istantanea, non lo può utilizzare, proprio perché opera in un contesto teorico di tipo geometrico.





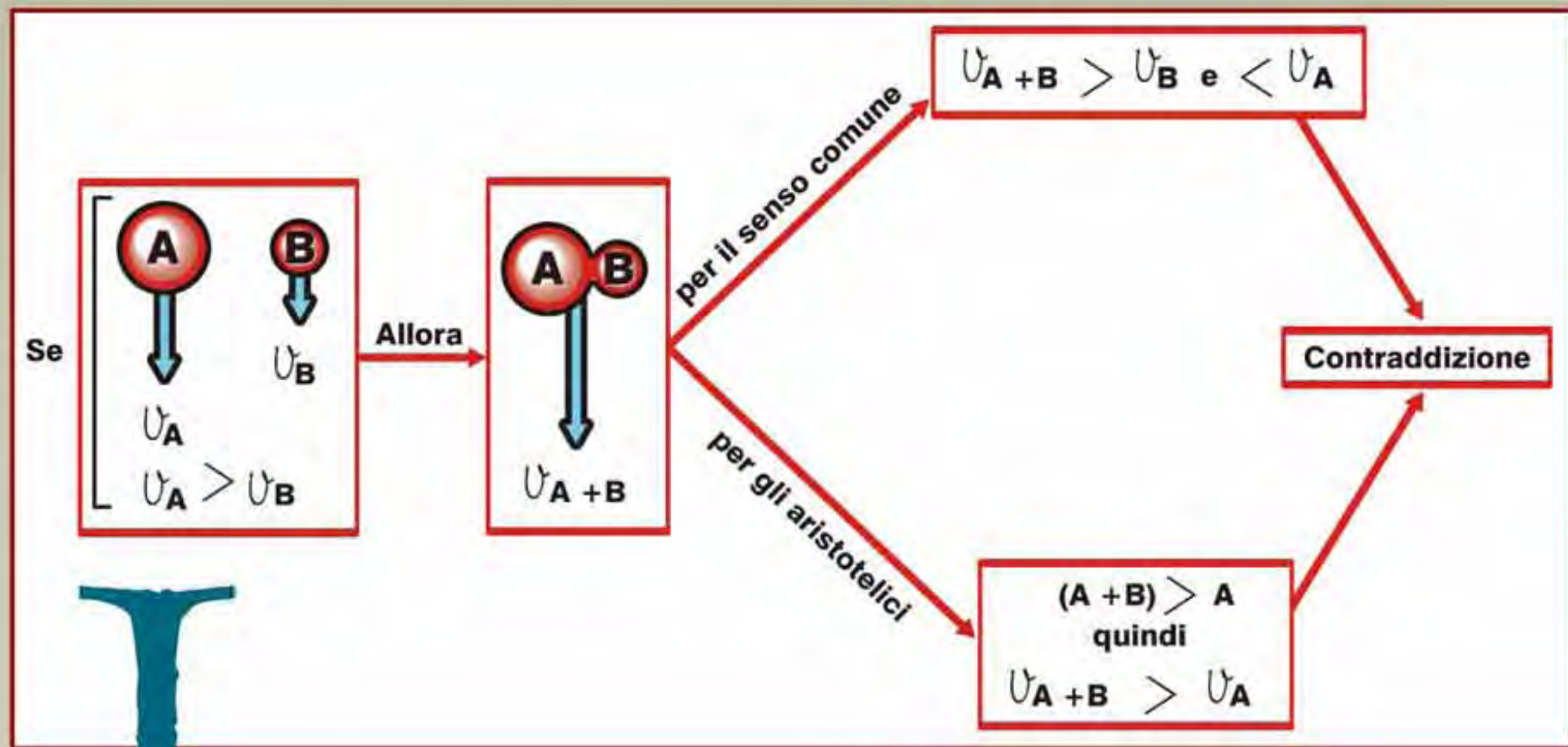
Gli esperimenti ideali

La costruzione teorica del pensiero galileiano **deve alla filosofia medioevale** alcuni elementi metodologici fondamentali, che possono essere visti come componenti strutturali a priori del modo di ragionare di Galileo:
il principio di semplicità e regolarità della natura.
il principio di non contraddittorietà.

Queste categorie permeano sempre il resoconto che Galileo fa degli esperimenti che a volte rappresentano la previsione di un risultato su base logico - deduttiva a partire da un'ipotesi intuita, a volte sono la descrizione rigorosa di procedimenti che non si poterono realizzare per mancanza di strumenti tecnici adeguati o per difficoltà intrinseche al fenomeno in esame: questi esperimenti oggi sono denominati **esperimenti ideali**.

A esperimenti di questo tipo, immaginati e descritti rigorosamente ma non eseguiti, **la fisica post-galileiana** e in particolare quella del XX secolo, ha spesso fatto ricorso con profitto: gli esperimenti ideali si sono rivelati infatti fonte ispiratrice di esperimenti reali. Ideati e realizzati sulla base di potenti analogie, magari a distanza di molti anni, esplicitando la pregnanza di significato e di metodo dei primi.

*Galileo
Esponde la
sua visione del
mondo fisico
all'allievo
Viviani*



La caduta libera dei gravi

Il problema

Due corpi di peso diverso cadono liberamente partendo dalla stessa quota: si muovono con velocità diverse (quello più pesante con velocità maggiore e quello più leggero con velocità minore) o piuttosto arrivano a terra nel medesimo tempo?

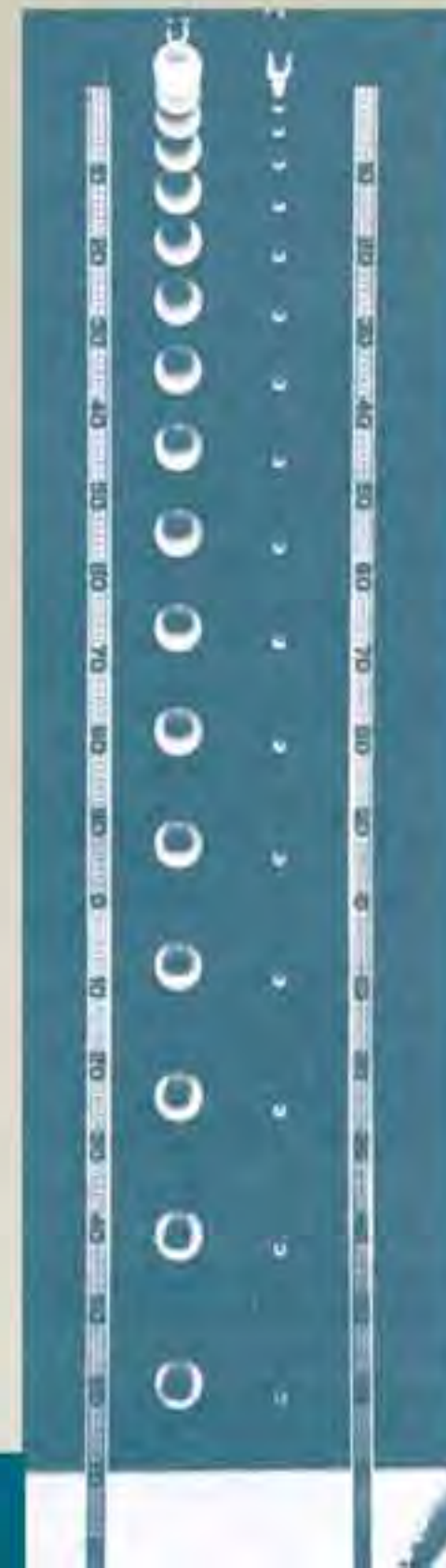
L'esperimento ideale

Galileo coglie una contraddizione intrinseca all'interpretazione aristotelica fondata sulla teoria dei luoghi naturali, in base alla quale un corpo più *grave* cade più velocemente di un corpo meno *grave*: caposaldo di questa impostazione è il principio di non contraddittorietà.

L'ipotesi Galileo:

corpi anche di gravità diversa cadono con la medesima velocità.

Ma il *senso comune* suggerisce che due sfere di peso diverso, che cadono dalla stessa altezza, non arrivano al suolo nel medesimo istante; ciò che conta però, nello studio del fenomeno fisico non è che i tempi siano *leggermente diversi*, ma che siano piuttosto *quasi uguali*.



Nella fisica moderna l'espressione in caduta libera indica che i gravi in esame cadono per effetto della sola forza gravitazionale, in presenza di effetti frenanti dovuti alla resistenza dell'aria (trascurabili).

La foto multi-flash mostra che, in un tubo a vuoto, due sfere di peso differente arrivano a terra contemporaneamente.



A - La nave procede con velocità costante. Il marinaio dall'alto dell'albero lascia cadere la pietra.



B - Secondo la previsione aristotelica: la pietra resta indietto.



C - Secondo la previsione galileiana la pietra conserva la velocità della nave.

L'intuizione del principio di inerzia

Il problema

Dal fatto che una pietra cada al piede dell'albero di un'imbarcazione, non si può arguire se la barca sia ferma o in moto rettilineo uniforme: analogamente, dal fatto che una pietra, rilasciata dall'alto di una torre, possa cadere ai suoi piedi, **non si può decidere se la Terra sia immobile o meno.**

Salviati - Voi dite: perché quando la nave sta ferma, il sasso cade al piè dell'albero, e quando ell'è in moto cade lontano dal piede, adunque, per il converso, dal cadere il sasso al piede si inferisce la nave star ferma, e dal caderne lontano s'argomenta la nave muoversi; e perché quello che occorre della nave deve parimenti accader della terra. Però dal cader della pietra al piè della torre si inferisce di necessità l'immobilità del globo terrestre. [...]

Or ditemi: se la pietra lasciata dalla cima dell'albero, quando la nave cammina con gran velocità, cadesse precisamente nel medesimo luogo nel quale casca quando la nave sta ferma, qual servizio vi presterebbero queste cadute circa l'assicurarvi se 'l vascello sta fermo oppur se cammina?

Simplicio - Assolutamente nessuna [...]

Salviati - Benissimo. Avete voi fatta mai l'esperienza della nave?

Simplicio - Non l'ho fatta [...] E voi, questa esperienza l'avete fatta, per parlarne con tanta sicurezza?

Nessuno aveva fatto questa pur semplice osservazione sperimentale: il primo a eseguirla pubblicamente nel **1641** sarà **Pierre Gassendi**. E tanto meno l'aveva fatto Galileo, che afferma invece il valore della previsione teorica rigorosa di risultati non ancora osservati, su un empirismo puro, che riconosca solo i fatti già osservati.

Salviati - Io senza esperienza sono sicuro, che l'effetto seguirà come vi dico, perché così è necessario che segua [...]

L'intuizione di Galileo

Il moto che si svolge a velocità costante è uno stato naturale, come lo stato di quiete, nel quale il corpo permane se non intervengono cause *violente* esterne che ne modificano la condizione statica o cinematica.



Galileo
con gli allievi
più fedeli

E sperimenti... sotto coperta

“Rinserratevi con qualche amico nella maggior stanza che sia sotto coverta di alcun grande navilio e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso; e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno uguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazi passerete verso tutte le parti.

Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succedere così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità, che (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazi che prima, né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso quella parte contraria al vostro salto; [...] le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi [...] e finalmente le farfalle e le mosche continueranno i

lor voli indifferentemente verso tutte le parti, né mai accadrà che si riduchino verso la parte che riguarda la poppa, quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo, trattenendosi per aria, saranno state separate; [...] E di tutta questa corrispondenza d'effetti ne è la cagione l'essere il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora, che per ciò dissi io che si stesse sotto coverta, che quando si stesse di sopra nell'aria aperta e non seguace del corso della nave, differenze più e men notabili si vedrebbero in alcuni de' gli effetti nominati”.

dal Dialogo sui Massimi Sistemi



Conoscenza & amicizia

Il metodo elaborato da Galileo ha costituito una presa di coscienza critica della capacità conoscitiva dell'uomo e ha portato un contributo decisivo e irreversibile nel cammino della conoscenza scientifica. Pur considerando aspetti particolari delle cose, cioè le loro caratteristiche in qualche modo misurabili, dimostrò subito una fecondità sorprendente e si rivelò così potente da destare l'entusiasmo incondizionato dei più.

Tuttavia, in un approccio conoscitivo che si portava con più rigore e attenzione sulle cause seconde, occorreva non staccarsi dalla Causa Prima. Si sarebbe esigita la presa di coscienza che le **diverse discipline** richiedono una **diversità di metodi**. Come pure che i due campi del sapere, quello che ha la sua fonte nella Rivelazione e quello che la ragione può scoprire con le sole sue forze, non sono del tutto estranei ma hanno punti di incontro, perché le metodologie proprie di ciascuno permettono di mettere in evidenza aspetti diversi della medesima realtà. Il pericolo di una irrazionale enfaticizzazione del metodo scientifico **non fu** certo una remota eventualità per la coscienza di Galileo il quale non sempre seppe mantenere la chiarezza espressa in alcune *Lettere*, come in quella a **Benedetto Castelli**.

Un'ipotesi suggestiva

È sorprendente notare come in questa lettera Galileo dimostri una straordinaria lucidità nella distinzione tra il metodo scientifico e quello teologico.

Probabilmente il tono della lettera risente delle prolungate e approfondite discussioni tra i due.

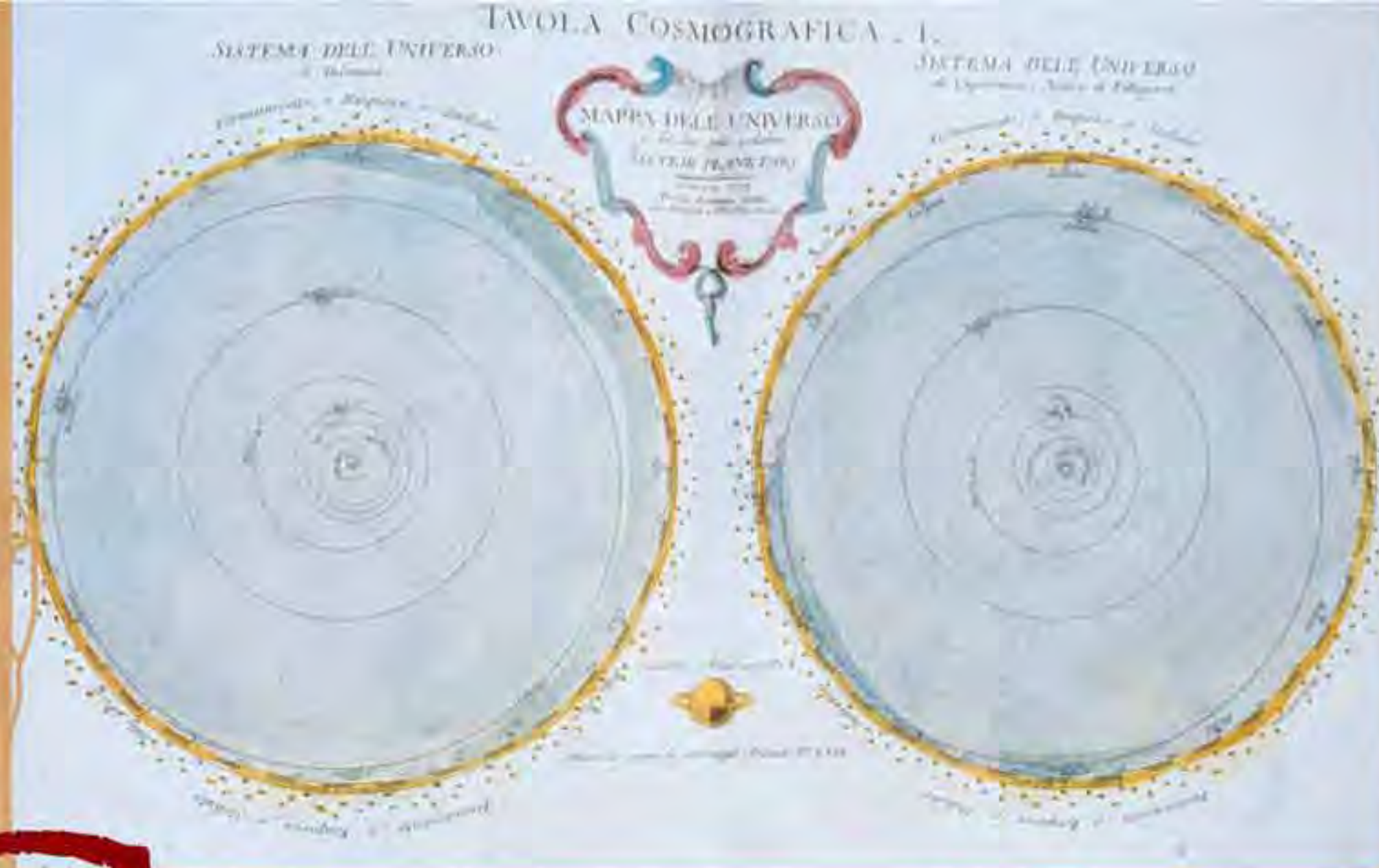
Benedetto Castelli, monaco **benedettino** e appassionato discepolo di Galileo fin dagli anni di permanenza a Padova, si è distinto per i suoi studi di meccanica, in particolare di idraulica, e ha mantenuto una posizione profondamente **unitaria** nei confronti del sapere: per lui l'osservazione scientifica era una forma di **contemplazione** e la natura un insieme di **segni**.

L'esame del Carteggio tra Castelli e Galileo porta in primo piano l'amicizia fedele, durata più di quarant'anni, di Castelli verso il maestro: il monaco benedettino non solo diede a Galileo un sostegno capace di solidarietà di fronte all'incomprensione ma costituì anche un argine nei confronti della **tentazione di autonomia** e di ribellione alla quale il temperamento sanguigno, se non arrogante,

di Galileo era continuamente sottoposto.

Non è quindi azzardata l'ipotesi, avanzata da alcuni, che l'amicizia con Castelli abbia contribuito in misura determinante ad evitare al maestro di cadere in una forma di scientismo positivista.

Pericolo che nei due secoli successivi non sarà evitato: lentamente si farà strada la convinzione che sia insensato e inutile porre domande sulla radice e sul significato fondamentale delle cose, e si diffonderà la **pretesa** che il solo livello scientifico possa appagare il nostro desiderio di conoscenza.



Confronto tra il sistema tolemaico e copernicano: a parte la diversa posizione di Sole e Terra, è impressionante la similitudine dei due modelli e il fatto che in entrambi le orbite siano eccentriche rispetto al corpo centrale

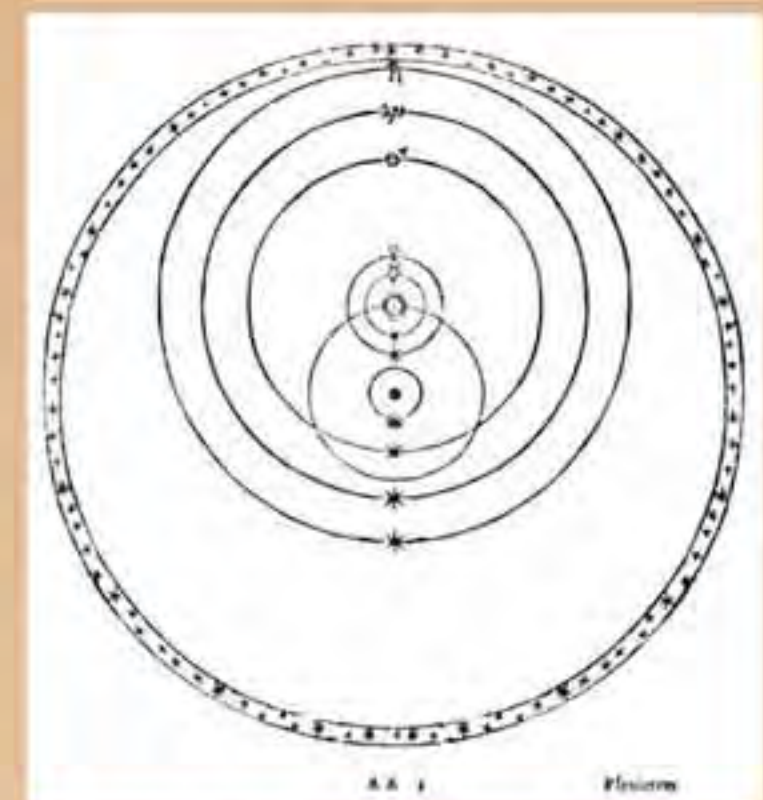
Copernico non è ancora “copernicano” (e Tolomeo non è poi così tolemaico)

Nel momento in cui scende in campo Galileo, il dibattito scientifico e filosofico sulla struttura dell'universo era molto vivace e vedeva fronteggiarsi una pluralità di modelli.

Il modello dominante era ancora quello **tolemaico**, descritto nell'*Almagesto* (130 d.C.) e basato sulla concezione cosmologica di Aristotele che poneva la **Terra fissa al centro dell'universo**. Tolomeo aveva elaborato un ingegnoso e complesso sistema geometrico che conservava i tradizionali moti circolari uniformi ma introduceva alcune innovazioni radicali, come gli eccentrici, gli epicicli e gli equanti, grazie alle quali riusciva a dar ragione anche di fenomeni inspiegabili nella visione aristotelica, come il moto retrogrado e la variazione della velocità angolare dei pianeti. La rivoluzione tolemaica aveva quindi già tolto alla Terra l'esclusiva della centralità e aveva a suo modo **anticipato Keplero** nel rendere variabile il movimento dei pianeti.

Il modello alternativo proposto da **Copernico** è detto **eliocentrico** in quanto colloca **il Sole al centro dell'universo**. L'astronomo polacco arriva a questa conclusione non tanto sulla base di nuovi dati osservativi ma spinto dall'esigenza di **semplificare** e dare maggior coerenza razionale alla costruzione tolemaica: il suo Cosmo, tutt'altro che “rivoluzionario”, resta quello finito e sferico dei medievali e molte sue argomentazioni sono di tipo aristotelico. L'operazione da lui compiuta si può riassumere in uno scambio del “sistema di riferimento”: un'operazione di grande portata concettuale che tuttavia, quanto a spiegazioni o previsioni, **aggiungeva ben poco** ai risultati già acquisiti da Tolomeo.

L'esigenza di superare la cosmologia tolemaica, nella seconda metà del Cinquecento si diffonde e porta ad elaborare altri modelli. Il più interessante è quello sviluppato da **Tycho Brahe**, maestro di Keplero e **grande osservatore**. E proprio per tener conto dei dati raccolti nel suo Osservatorio sull'isola di Uraniborg, Tycho propone un sistema nel quale i pianeti ruotano attorno al Sole e questo, con le stelle, gira attorno alla Terra che resta aristotelicamente immobile al centro.



Il sistema di Tycho Brahe