

Insegnare la fisica come ricerca
alcuni esempi

Premessa

Tutta la fisica, anche quella che oggi appare più banale e scolastica, è stata un tempo ricerca avanzata.

D'altra parte non pochi concetti e fenomeni che siamo abituati a considerare “ovvi,” “elementari” ... hanno richiesto grandi sforzi per essere capiti.

Ancor oggi non sono affatto ovvi ed elementari per chi comincia (e purtroppo non lo sono neppure per la stragrande maggioranza dei cittadini, compresi quelli che si considerano “colti”).

È perciò opportuno, anche nelle trattazioni “scolastiche,” mettere in evidenza l'aspetto della *ricerca*, della *conquista*, attraverso cui sono passati argomenti che troppo spesso siamo abituati a presentare invece come canonici, scontati...

Precisiamo: non sto sostenendo un approccio *storico* all'insegnamento della fisica. Anzi, su questo avrei diverse perplessità.

Né tanto meno sto proponendo di ridurre la fisica a storielle.

Ma dovrebbe essere parte integrante dell'insegnamento (anche allo scopo di motivarlo e di accrescerne l'interesse):

- fornire la consapevolezza che ogni risultato è stato conseguenza di un lavoro di ricerca
- chiarire la relazione tra i concetti base della fisica e i passi avanti nella comprensione del mondo fisico.

Per spiegare che cosa intendo, la cosa migliore è di passare a vedere alcuni esempi.

La forma della Terra

Ai tempi di Newton è un problema di ricerca attiva: la Terra è schiacciata o allungata?

Le misure davano risultati contrastanti.

Metodi di misura:

- la lunghezza dell'arco di meridiano
- il valore di g .

In entrambi i casi, si tratta di confrontare i valori a latitudini diverse: se la Terra è schiacciata, l'arco di 1° è *più lungo* vicino al Polo (cosa non tanto ovvia ...). Anche g sarà *maggiore*.

Viceversa se è allungata.

Newton sviluppa un argomento teorico, in base al quale la Terra deve essere schiacciata, a causa della forza centrifuga.

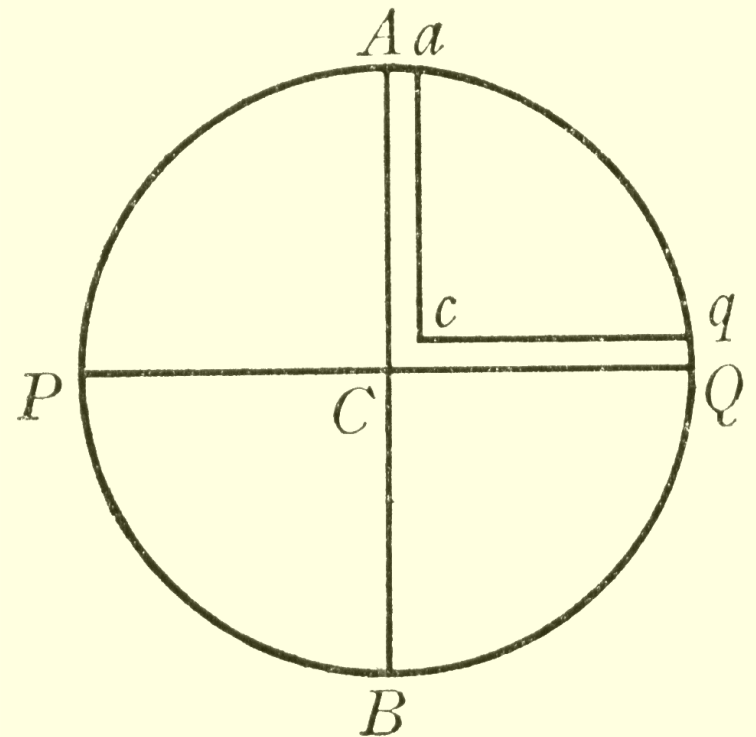
Riesce anche a fare il calcolo e a stimare l'entità dello schiacciamento in **1:230** (il valore moderno è **1:298**).

Il metodo usato da Newton è accennato nella figura (presa dai *Principia*).

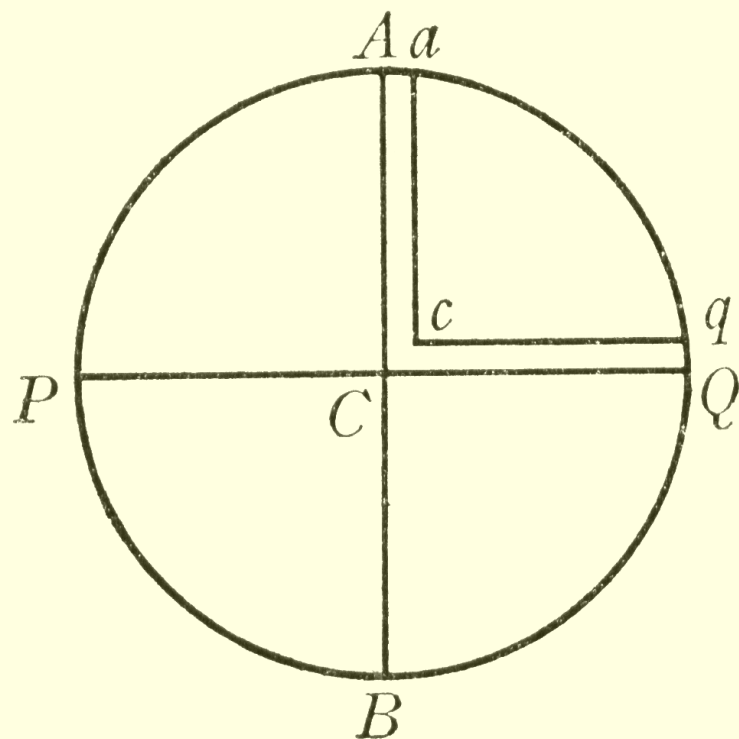
Newton immagina un canale ACQ, pieno d'acqua, e calcola le lunghezze AC e CQ necessarie perché l'acqua sia in equilibrio.

Ovviamente $CQ > AC$, per due ragioni:

- 1) la forza centrifuga riduce il peso dell'acqua nel ramo equatoriale
- 2) se la Terra è schiacciata, il campo gravitazionale lungo CQ è minore che lungo CA.



La questione, dal punto di vista sperimentale, verrà risolta definitivamente solo dopo la morte di Newton.



La caduta dei gravi e la relatività (ristretta e generale)

Il moto dei gravi è un argomento di quelli che ho chiamato “canonici” e che gli studenti non amano, tra l'altro perché lo sentono “vecchio”: ma che importanza può avere come cadono i sassi, i proiettili...

Eppure qui si toccano alcuni dei temi più fondamentali della fisica.

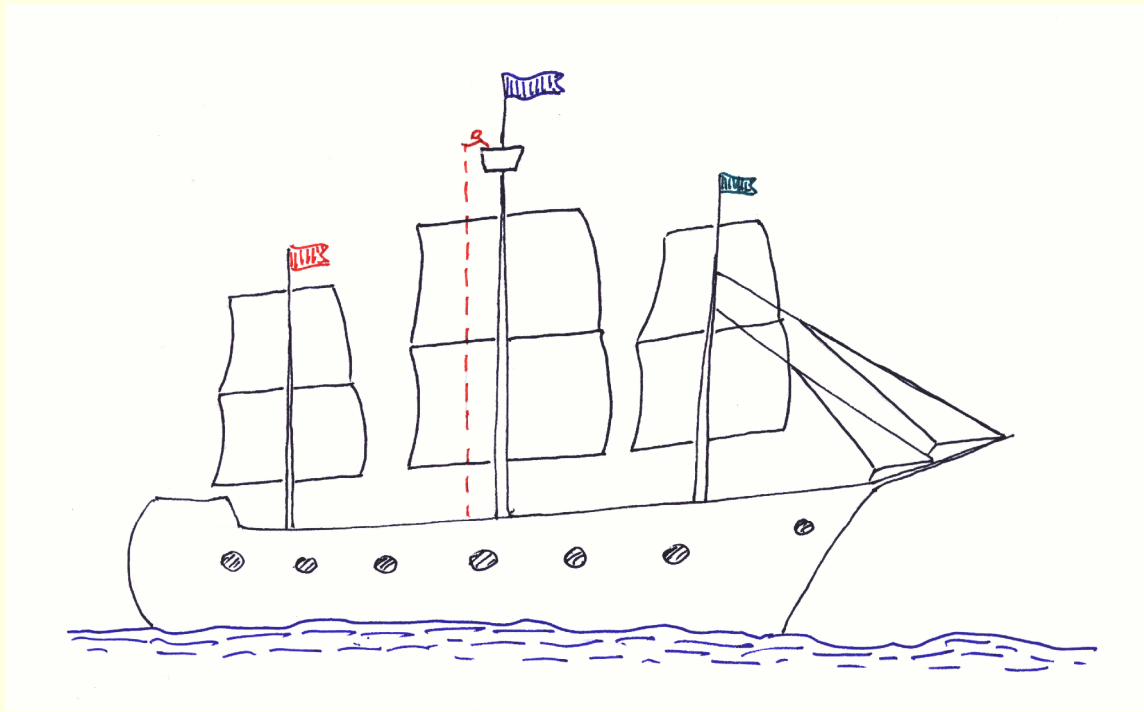
Basta porsi le giuste domande:

- tutti i gravi cadono con la stessa accelerazione: *perché?*
- il moto orizzontale si “compone” col moto verticale: *che cosa ne segue?*

Il moto orizzontale si “compone” col moto verticale *che cosa ne segue?*

Questa domanda è strettamente connessa col *principio di relatività*, come lo stesso Galileo scopre e mette in evidenza.

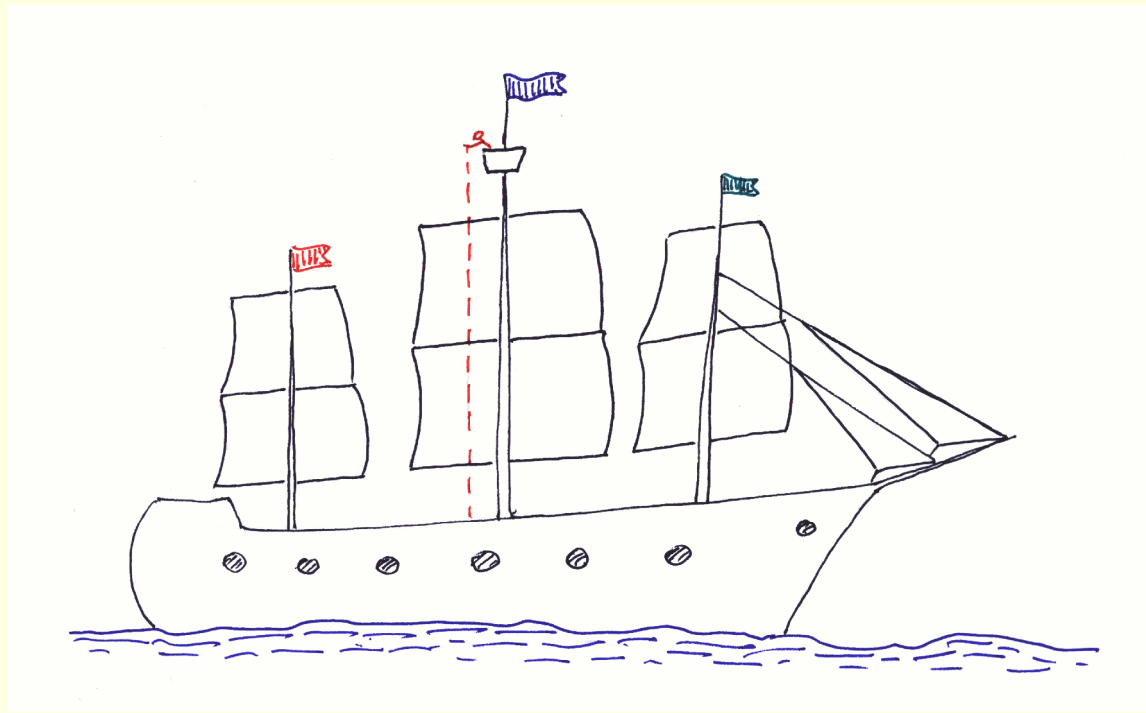
Un sasso fatto cadere dalla cima dell'albero di una nave in moto, se visto da un riferimento fisso alla Terra, conserva la velocità che aveva la mano che lo ha lasciato: quella della nave.



Il sasso descrive perciò una *traiettoria parabolica*, ma impiega a toccare il ponte della nave *lo stesso tempo* che avrebbe impiegato con la nave ferma.

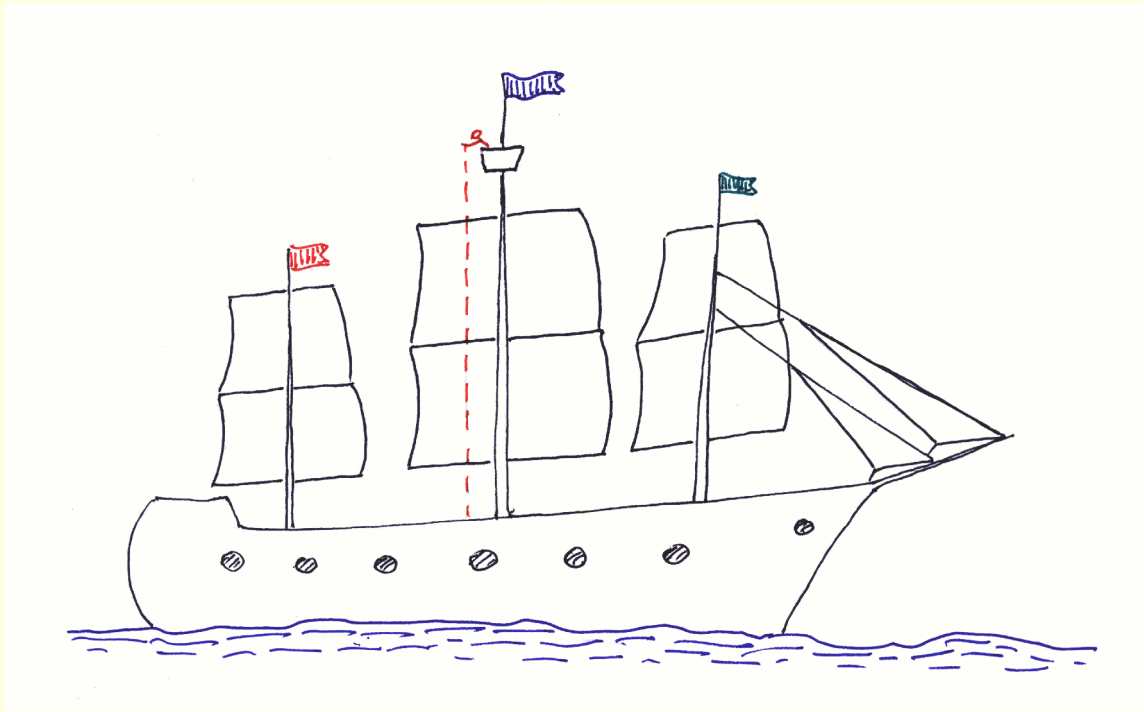
Ciò implica che invece, visto da un riferimento solidale alla nave, il sasso cade *esattamente in verticale*, arrivando al piede dell'albero, sempre nello stesso tempo.

Conclusione: il moto del sasso nel riferimento della nave è lo stesso di quello di un sasso che cade sulla Terra partendo da fermo: *principio di relatività*.



Occorre prima di tutto mettere in evidenza che per Galileo il principio di relatività serve a uno scopo ben preciso: se è vero che sulla nave in moto i sassi cadono come se fosse ferma, allora gli esperimenti condotti sulla Terra *non possono dire niente* né pro né contro il moto della Terra.

Ma c'è di più: niente vieta di far notare che Einstein riprende — 3 secoli dopo — esattamente l'enunciato galileiano, salvo affermare in modo esplicito che questa equivalenza dei due riferimenti *si estende a tutti i fenomeni e a tutte le leggi fisiche*.



Tutti i gravi cadono con la stessa accelerazione: *perché?*

Anche questa domanda è stata ripresa in tempi più recenti.

In primo luogo, l'indipendenza della legge di caduta dalla natura del corpo è stata verificata (indirettamente) con altissima precisione (fino a 12 cifre).

Ma più importante è stato anche qui il contributo teorico di Einstein: se tutti i gravi cadono con la stessa accelerazione — e più in generale, si muovono allo stesso modo in un campo gravitazionale — allora *la gravità non è una proprietà dei corpi, ma dello spazio in cui essi si muovono.*

Questa si chiama “geometrizzazione della gravità.”

(Più esattamente, avrei dovuto dire “è una proprietà dello *spazio-tempo*”: quell'entità che già con la RR ha preso il posto dello spazio e del tempo assoluti di Newton.)

È questo il punto di partenza della *Relatività Generale*.

Perché non accennare fin dall'inizio alla connessione fra le “semplici” leggi della caduta dei gravi e uno dei più grandi risultati della fisica del 20-mo secolo?

Le leggi dei gas

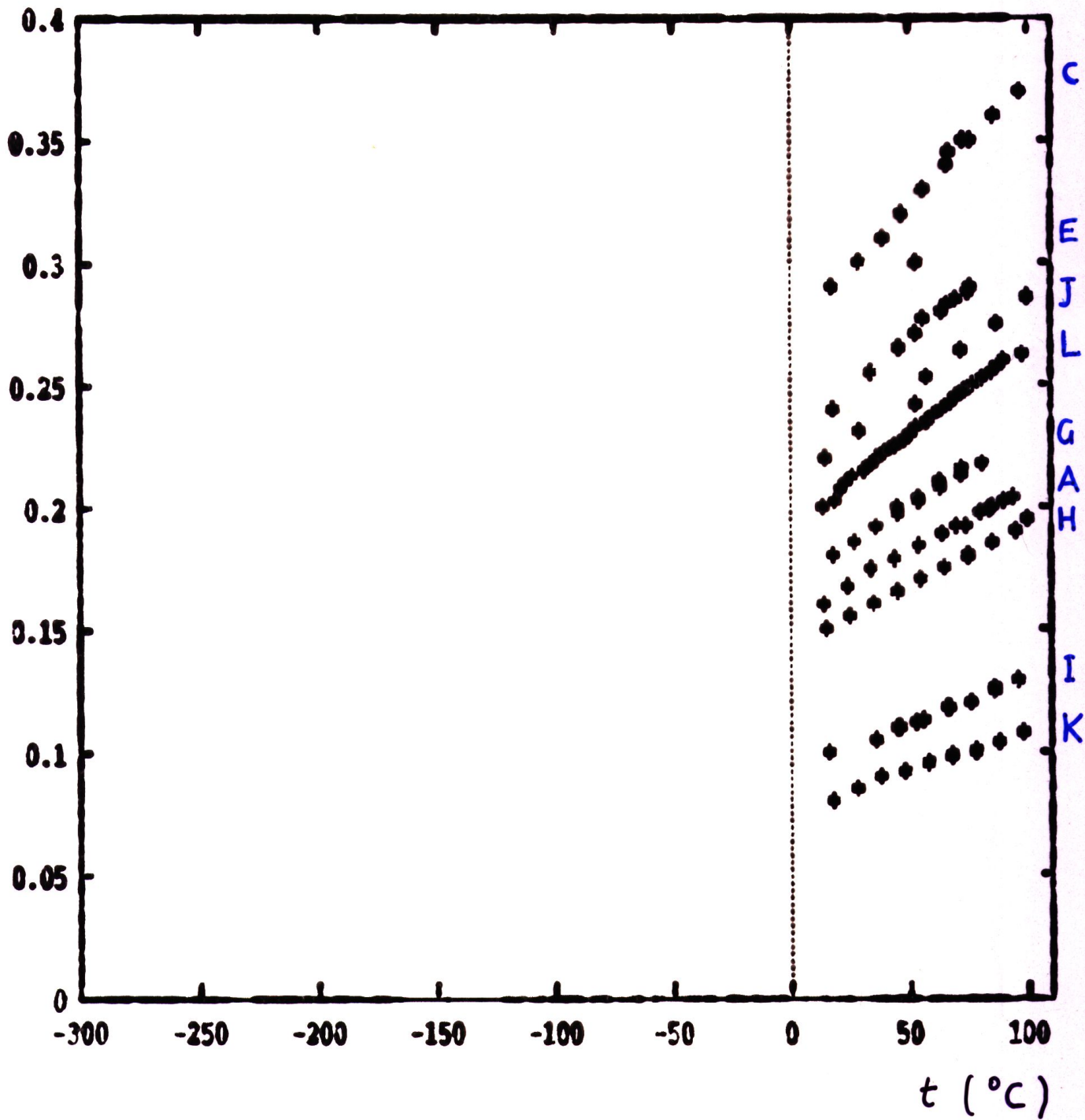
Lo studio della natura dei gas ha inizio con Boyle (1660) e prosegue fino ai primi dell'800 (Avogadro).

(In realtà anche molto oltre: poi vedremo.)

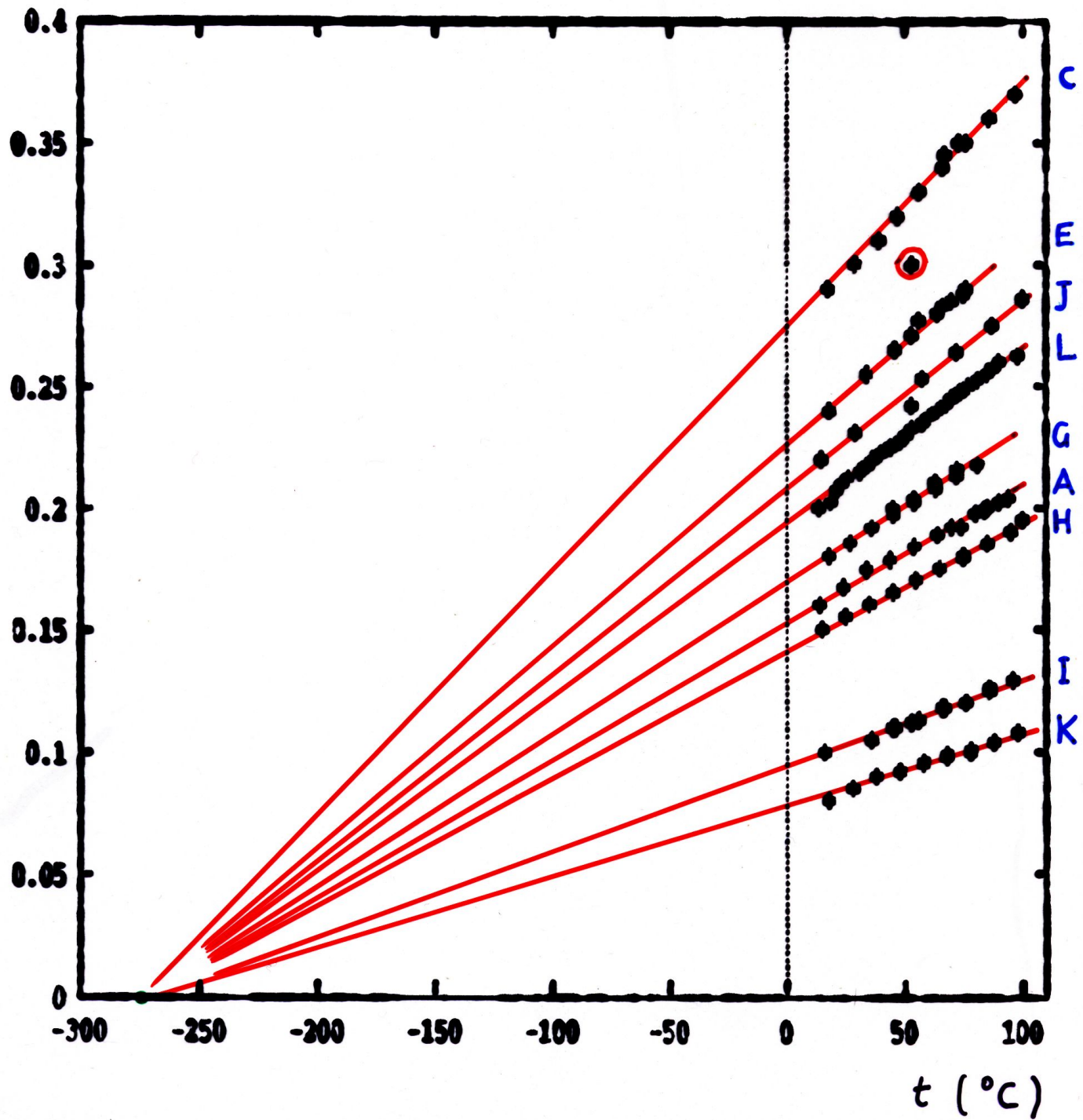
Ecco un altro capitolo “canonico” della fisica, di cui spesso non si coglie il significato profondo.

Vediamo ad es. un grafico preso da esperimenti reali, sulla dilatazione isobara di diversi gas.

$V \text{ (cm}^3\text{)}$



V (cm³)



Sebbene grossolane, le misure suggeriscono per tutti i gas un *andamento lineare*, e le diverse rette intersecano l'asse delle temperature *circa nello stesso punto*.

Misure più precise confermano questo fatto.

È ben noto che questo è il punto di partenza per introdurre la temperatura assoluta; ma le questioni essenziali sono altre:

– *perché* succede questo?

– *che cosa hanno in comune* i diversi gas, per comportarsi in questo modo?

Sappiamo che la spiegazione sta nella “teoria cinetica,” che interpreta la pressione come effetto degli urti delle molecole sulle pareti, e connette la temperatura assoluta con l'energia cinetica delle molecole.

Dunque, ancora una volta: *fatti sperimentali semplici* (ma non ovvi) sono il punto di partenza di un percorso lungo e complesso, che porta a una teoria sulla *costituzione della materia* allo stato gassoso.

Che cos'è il calore?

L'indagine sulla *natura* del calore attraversa all'ingrosso 150 anni di storia della fisica.

È un problema tipico di una certa fase della ricerca fisica: abbiamo delle sensazioni e vediamo dei fenomeni, che in questo caso raccogliamo sotto il termine “calore”; ma *di che si tratta?* qual è la “*vera natura*” di quella cosa che chiamiamo “calore”?

Non posso certo rifare qui tutta la storia, ma andando per cenni grossolani...

La prima idea è che il calore sia un “fluido sottilissimo” (il “calorico”) contenuto nei corpi, e che passa da un corpo all'altro nei fenomeni termici.

(Notare che la nostra terminologia attuale ricorda ancora questa visione, per es. quando parliamo di “perdere” o di “acquistare” calore...)

Assai presto però si sviluppa un'ipotesi alternativa: che il calore sia la forma macroscopica del moto disordinato delle particelle invisibili di cui la materia è costituita.

Tutta la storia che segue è la “lotta” tra queste concezioni, che termina — come sappiamo — col successo della seconda.

Ricordiamo alcuni nomi di sostenitori del calorico: Poisson, Lavoisier, Carnot...

Forniscono invece argomenti contro il calorico: Rumford, Clausius, Joule, Meyer...

Si può forse considerare un “agnostico” Fourier, che sviluppa la teoria della propagazione del calore senza far uso esplicito di nessun modello.

La teoria del calorico deve molto a J. Black, che a metà del '700, con diversi esperimenti, stabilisce le leggi fondamentali della calorimetria: conservazione del calore nel passaggio da un corpo a un altro, calore specifico, calore latente...

Allo stesso tempo D. Bernoulli compie i primi passi della *teoria cinetica dei gas*, dimostrando che la pressione di un gas può essere spiegata come effetto degli urti delle molecole.

Alla fine del '700 B. Thompson (conte di Rumford) dimostra che mediante lavoro meccanico è possibile produrre *una quantità indefinita di calore*.

Prova anche che il calore “non ha peso,” confrontando il peso di acqua liquida e ghiacciata.

Gli esperimenti di Joule sono troppo noti per parlarne.

Mayer segue un percorso parallelo e dà una prima formulazione della *conservazione dell'energia*, calore incluso: quella che sarebbe poi divenuta la prima legge della termodinamica. Siamo prima della metà dell'800.

Meno di 20 anni dopo, Clausius dà forma precisa alla teoria cinetica dei gas: la relazione fondamentale della teoria permette d'interpretare la temperatura assoluta come *misura dell'energia cinetica media* delle molecole.

Con questo la lunga ricerca sul calore potrebbe dirsi conclusa, se non mancasse un passaggio finale: le molecole (e gli atomi) *esistono realmente?*

La realtà degli atomi

La battaglia sulla realtà degli atomi (e delle molecole) attraversa tutto l'800 e oltre.

Comincia dalle “ipotesi” di Dalton e Avogadro, che vengono adottate dai chimici, in quanto spiegano i fenomeni in modo semplice, ma solo come modelli privi di realtà.

Ancora alla fine dell'800 alcuni fisici e chimici (Mach, Ostwald...) obiettono che non esiste alcun dato quantitativo sicuro sulle dimensioni di queste ipotetiche particelle. Si tratta quindi solo di comode convenzioni.

Per la stessa ragione viene duramente contrastata la “meccanica statistica” di Maxwell–Boltzmann, che si propone di ricondurre la termodinamica alla meccanica attraverso il comportamento — individualmente irregolare ma statisticamente regolare — di atomi e molecole.

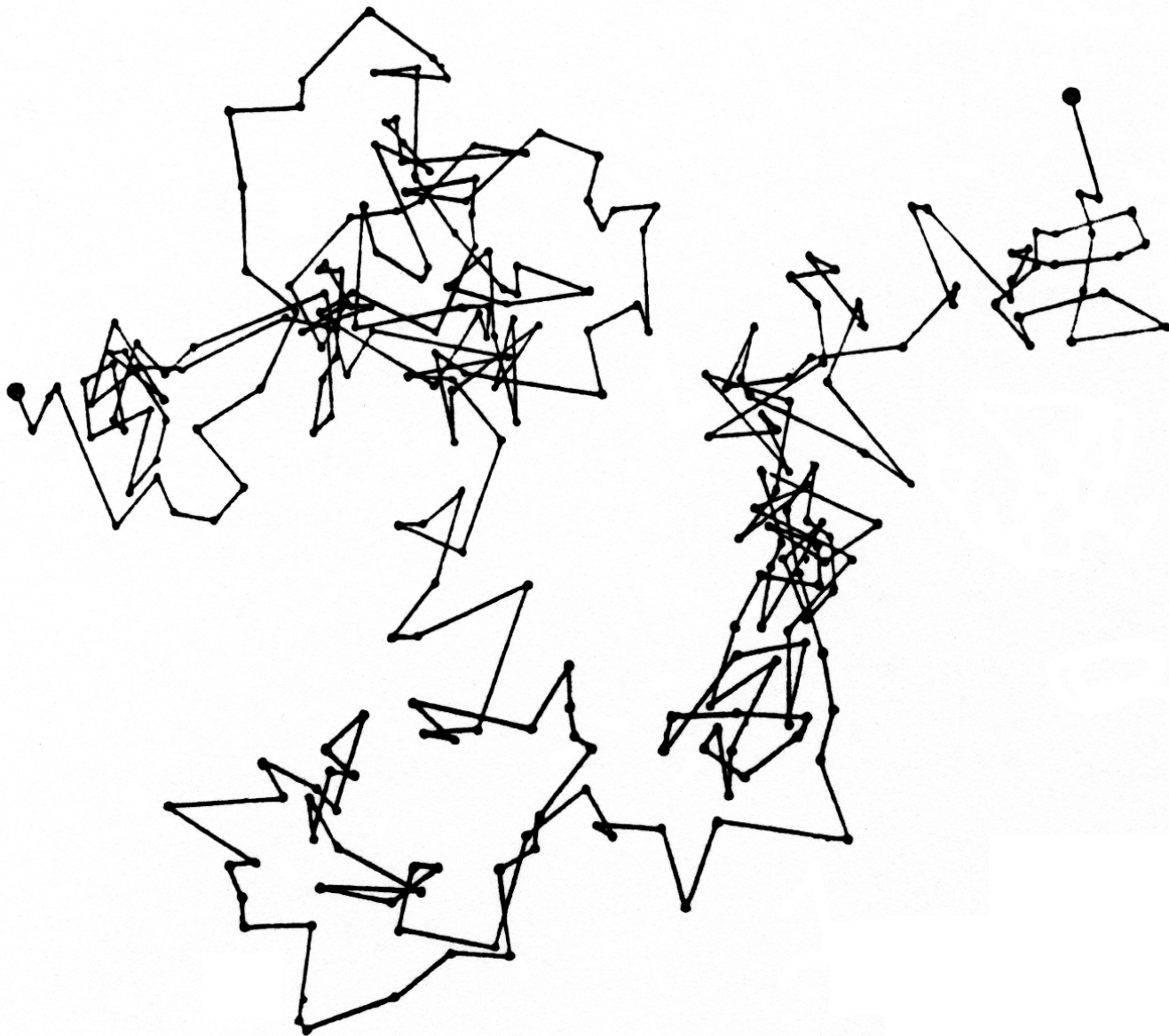
Il moto browniano

Scoperto agli inizi dell'800, si dimostrerà la prova vincente.

Dapprima interpretato come manifestazione vitale dei granuli di polline, si vede poi che ha carattere del tutto indistruttibile nel tempo; che si verifica anche per particelle che non hanno niente a che fare con organismi viventi.

Si fa strada l'ipotesi che si tratti di una manifestazione “mesoscopica” (per usare un termine moderno) dell'agitazione termica molecolare.

Ma solo ai primi del '900 Perrin esegue misure accurate, mentre Einstein elabora una teoria che risulta in accordo con le misure e soprattutto *permette la misura di costanti microscopiche*, come la costante k di Boltzmann o quella N_A di Avogadro.



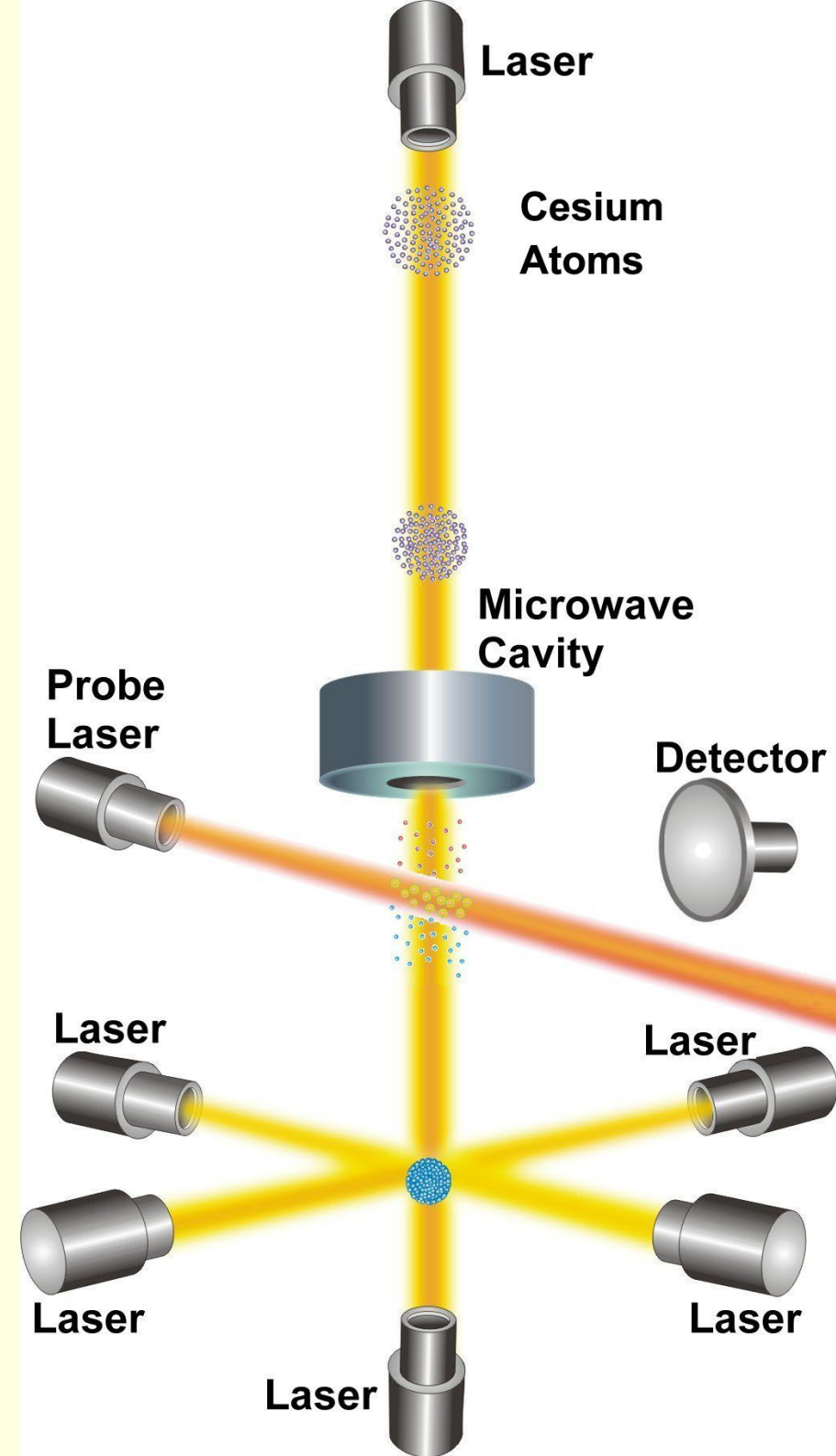
0 10 20 30 40 50 μm

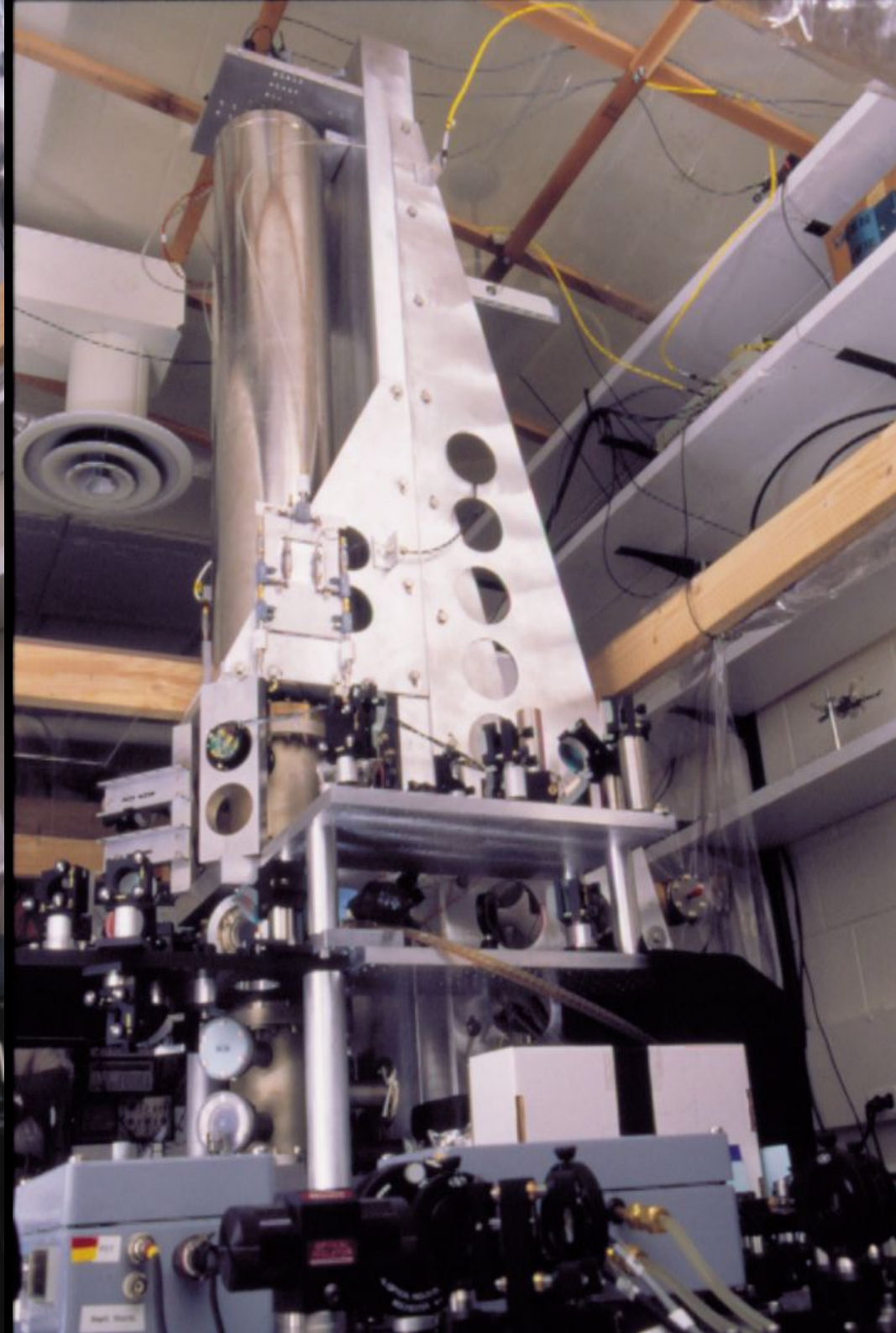
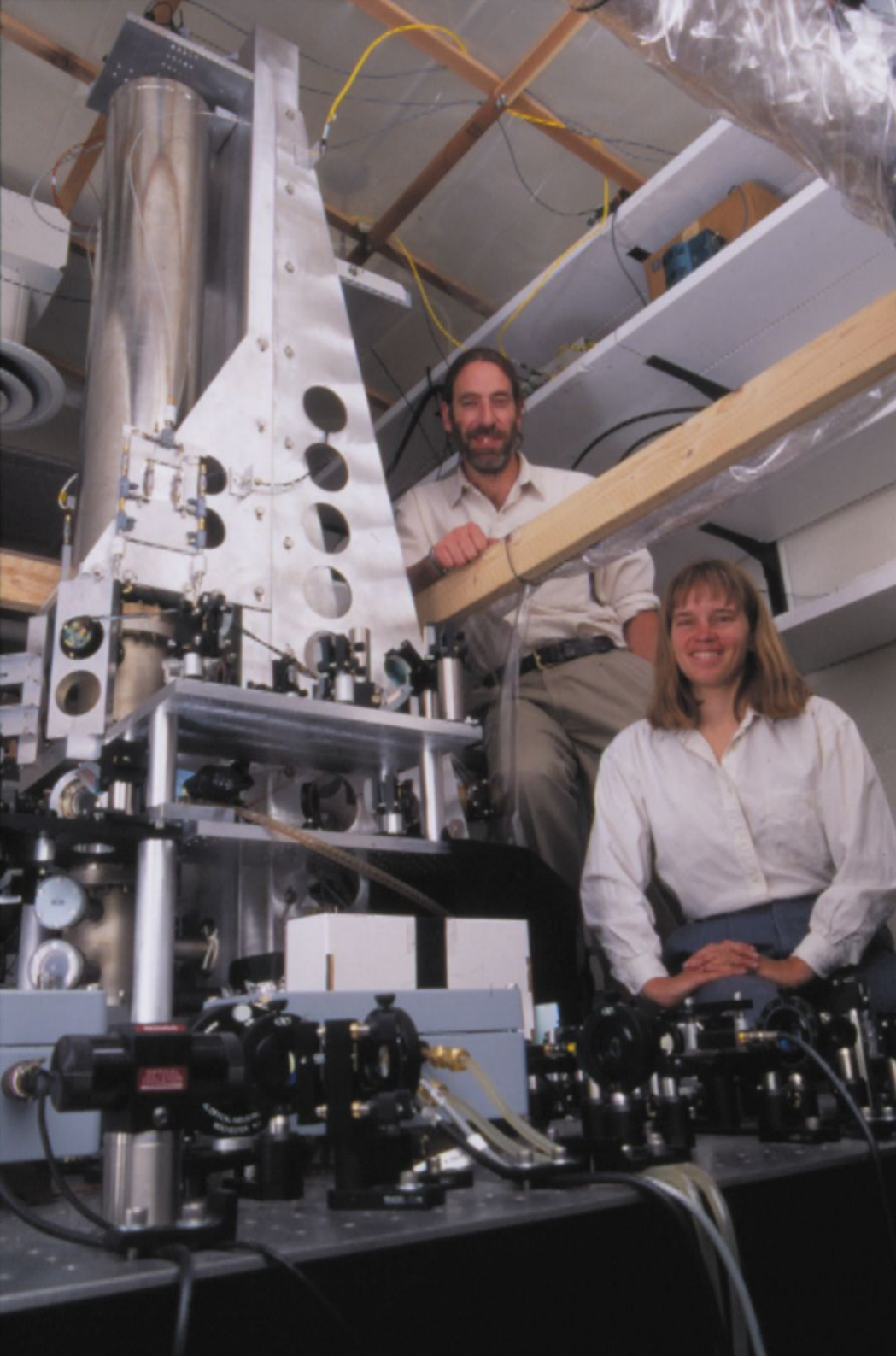
A un secolo di distanza, nessuno dubita più della realtà degli atomi, di cui oggi sappiamo tutto, e che riusciamo a controllare e in certe condizioni anche a “vedere.”

La figura mostra lo schema di un *orologio a fontana atomica*.

Un gruppo di atomi di Cesium viene lanciato verso l'alto grazie alla spinta di un impulso dal laser in basso.

Sale, si ferma e ricade ... esattamente come i gravi di Galileo.





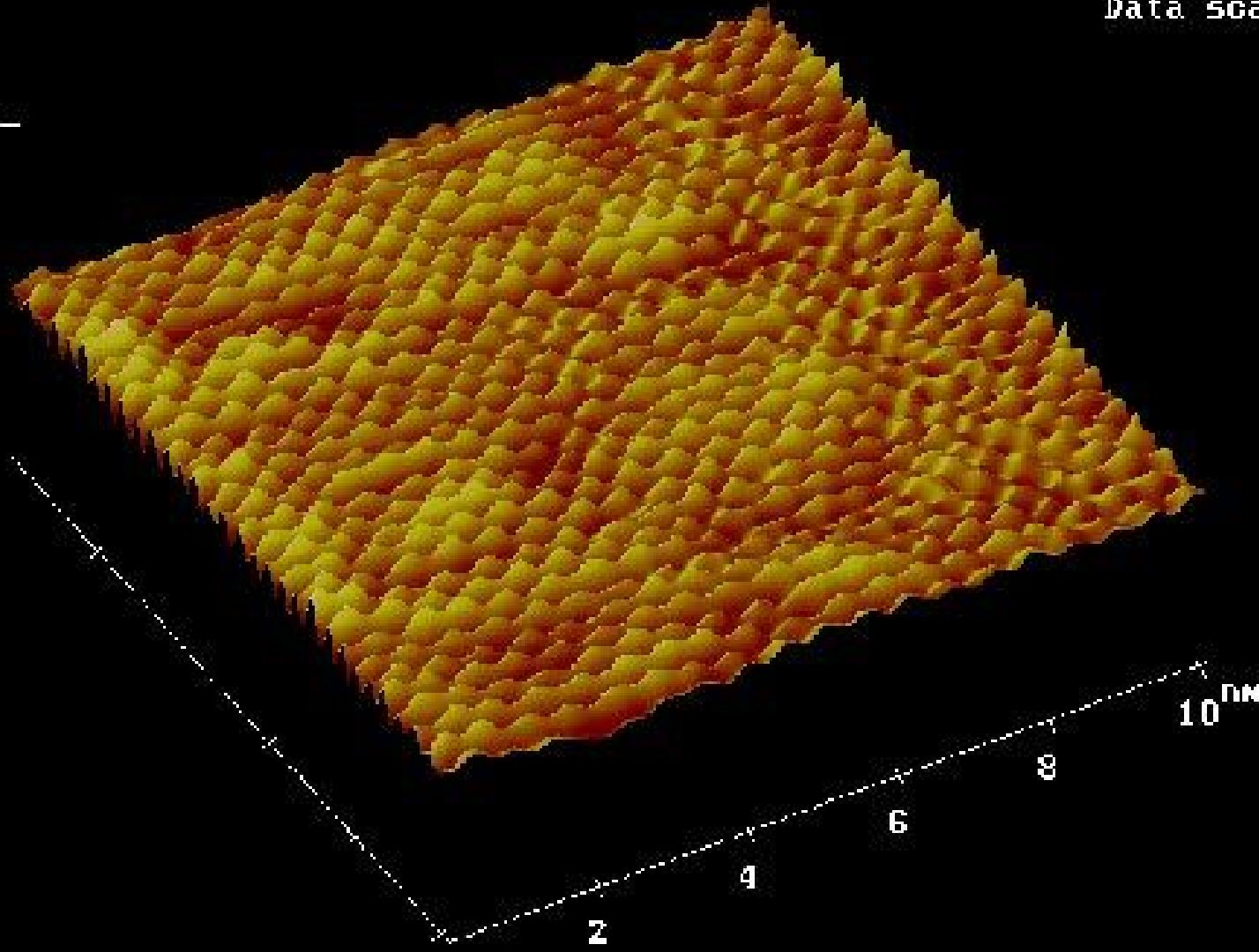
La figura che segue mostra un cristallo di mica, visto con un *microscopio a forza atomica*.

Le protuberanze sono *singoli atomi*.

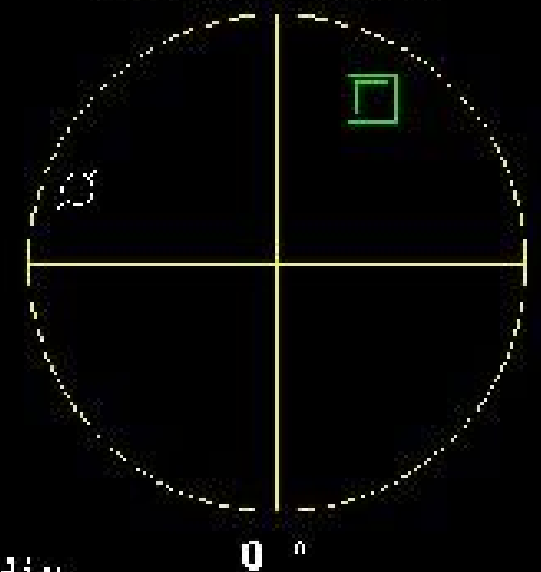
Superfluo notare che qui “visto” va inteso in un senso molto indiretto: l'immagine è in realtà un'elaborazione a computer delle misure fornite dallo strumento.

(Ma questo oggi è normale: vale per es. anche quando ci facciamo una “risonanza magnetica”...)

Digital Instruments NanoScope
Scan size 10.05 nm
Scan rate 15.26 Hz
Number of samples 512
Image Data Height
Data scale 1.000 nm



└ view angle
☉ light angle



X 2.000 nm/div
Z 1.000 nm/div

04011444.001

Riepiloghiamo

Ho fornito alcuni esempi di capitoli della fisica che dietro un'apparenza “scolastica” hanno un significato profondo e hanno avuto grande peso nella comprensione del mondo.

Abbiamo visto:

- la forma della Terra
- la caduta dei gravi
- le leggi dei gas
- che cos'è il calore
- la realtà degli atomi.

Molti altri ne avremmo potuti vedere, se ne avessimo avuto il tempo.

Un paio di esempi:

- che cos'è la luce
- elettricità, magnetismo, onde e.m.: la grande unificazione.

Ma quella che conta è l'idea generale: per motivare allo studio della fisica occorre trasmettere — accanto agli indispensabili strumenti tecnici e concettuali — anche le *idee* che ci sono dietro e lo *sforzo* che generazioni di ricercatori hanno speso per chiarirle e verificarle.