



E S E . . . ?

**Esperimenti mentali
tra fisica e filosofia**

Lorenzo Pantieri

Lorenzo Pantieri
E se...?
Esperimenti mentali tra fisica e filosofia
Copyright © 2025

 lorenzo.pantieri@gmail.com

La fantasia è un laboratorio infinito.

— Max Planck

Dedicato a tutti gli studenti di fisica.
E di filosofia.

INDICE

Introduzione	7
I Fisica	
1 Scoperte	11
1.1 La torre di Galileo	11
1.2 I piani inclinati di Galileo	13
1.3 La nave di Galileo	14
1.4 Il cannone di Newton	15
1.5 Il treno di Einstein	16
1.6 L'ascensore di Einstein	19
1.7 Il microscopio di Heisenberg	22
2 Paradossi	33
2.1 Achille e la tartaruga	33
2.2 La freccia di Lucrezio	36
2.3 Il secchio di Newton	37
2.4 Il demone di Laplace	38
2.5 Il diavoletto di Maxwell	38
2.6 Il gatto di Schrödinger	40
2.7 Il paradosso EPR	42
II Filosofia	
3 Etica e giustizia	55
3.1 L'anello dell'invisibilità	55
3.2 L'esperimento del carrello	56
3.3 La macchina dell'esperienza	58
3.4 Il violinista di Thomson	59
3.5 Il velo d'ignoranza	59
4 Scelte e decisioni	67
4.1 Il dilemma del prigioniero	67
4.2 Il mercato ideale	70
4.3 L'economia di Robinson Crusoe	70
5 Mente e conoscenza	77
5.1 La nave di Teseo	77
5.2 Il principe e il calzolaio	78
5.3 Il cervello in una vasca	79
5.4 La stanza cinese	80
5.5 Mary la scienziata	80

A Cronologia	89
Bibliografia	91
Indice analitico	93

INTRODUZIONE

L'immaginazione è più importante della conoscenza. La conoscenza è limitata, mentre l'immaginazione abbraccia il mondo intero.

Albert Einstein

Un **esperimento mentale** è un esperimento concepito solo nella mente, senza essere realizzato nella pratica.

Fu un fisico, Hans Ørsted, a coniare il termine “esperimento mentale” (*Gedankenexperiment*, in tedesco), all'inizio dell'Ottocento. E fu un fisico e filosofo, Ernst Mach, a renderlo celebre.

Anche se la parola è recente, la storia degli esperimenti mentali è antichissima. Venticinque secoli fa, il filosofo Zenone di Elea elaborò alcuni paradossi per mostrare che il movimento non è così ovvio come sembra e che l'intuizione può ingannarci.

Nei secoli successivi, i filosofi usarono scenari immaginari per esplorare idee complesse. Nell'antichità, Platone ipotizzò un uomo dotato di un anello che lo rende invisibile e si chiese se avrebbe continuato a comportarsi bene. Nell'età moderna, Locke trasferì l'anima di un principe nel corpo di un calzolaio per mostrare che la nostra identità risiede nella coscienza, non nel corpo.

Con la nascita della nuova **fisica**, inaugurata da Galileo, gli esperimenti mentali diventano decisivi. Galileo immagina torri per studiare la caduta dei gravi, navi senza scosse per formulare il principio di relatività e piani infiniti per scoprire il principio di inerzia. Newton usa un cannone su una montagna per formulare la legge di gravitazione universale. Einstein immagina un treno velocissimo per mostrare che la velocità altera il tempo e considera un ascensore in caduta libera per illustrare l'equivalenza tra gravità e accelerazione.

Gli esperimenti mentali non richiedono strumenti o laboratori, ma solo la mente. Riorganizzano quello che sappiamo, combinano idee note e rivelano conseguenze inattese. Non sostituiscono l'osservazione, ma la preparano e mostrano che cosa regge o vacilla in una teoria.

Alla base degli esperimenti mentali c'è l'idea che la nostra mente possa comprendere la realtà. Questa intuizione risale a venticinque secoli fa: Pitagora, il primo uomo a definirsi filosofo, scoprì che le lunghezze delle corde vibranti che producono suoni consonanti stanno in rapporti matematici precisi, tutti razionali, e formulò la massima «tutto è (numero) razionale». In altre parole, il mondo è comprensibile attraverso la ragione.

Non solo la fisica, ma anche altre discipline usano esperimenti mentali. La **filosofia** inventa dilemmi morali e scenari impossibili per capire che cosa è giusto. L'**economia** considera individui razionali e mercati perfetti per studiare le scelte. La **psicologia** indaga decisioni, percezioni e stati mentali che non possiamo osservare direttamente.

Questo libro esplora due territori in cui gli esperimenti mentali hanno avuto un ruolo decisivo: la fisica e la filosofia (non a caso, *Fisica e filosofia* è il titolo di una famosa opera Heisenberg).

La prima parte, dedicata alla fisica, è divisa in due capitoli.

- **Il capitolo 1** raccoglie esperimenti mentali sul moto, lo spazio, il tempo e la misura.
- **Il capitolo 2** presenta esperimenti “sbagliati” o paradossali, in cui errori apparenti aiutano a chiarire concetti e teorie.

La seconda parte è dedicata alla filosofia e si articola in tre capitoli.

- **Il capitolo 3**, sull'etica e la filosofia del diritto, esplora le intuizioni sul bene e sul giusto.
- **Il capitolo 4**, riservato all'economia, analizza come ragioniamo e scegliamo.
- **Il capitolo 5**, relativo alla psicologia, indaga quello che possiamo sapere e i limiti dell'esperienza.

Conclude l'opera un'appendice.

- **L'appendice A** elenca gli esperimenti mentali presentati nel libro.

Spero che ti diverta a leggere questo libro quanto io mi sono divertito a scriverlo.



Parte I

FISICA

1

SCOPERTE

Il pensiero crea un nuovo mondo.

Werner Heisenberg

La fisica usa spesso esperimenti che non si possono realizzare davvero. Una nave che scorre senza scosse, una torre altissima, un treno ultrarapido o un ascensore che cade nel vuoto sono strumenti di ragionamento: immagini semplici che mettono a nudo un'idea e diventano piccoli laboratori mentali che rivelano come stanno le cose. Servono a guardare più a fondo dentro una teoria e a capire meglio il mondo proprio perché mettono in scena l'impossibile.

In questo capitolo vedremo tre esperimenti mentali di Galileo: **la torre**, che mostra la legge della caduta dei corpi, **i piani inclinati**, che permettono di intuire il principio di inerzia, e **la nave**, che porta al principio di relatività. Esamineremo poi **il cannone di Newton**, che conduce alla gravitazione universale, **il treno e l'ascensore di Einstein**, che rivelano la teoria della relatività, e infine il **microscopio di Heisenberg**, che mostra i limiti dell'osservazione imposti dalla meccanica quantistica.

Gli esperimenti mentali di questo capitolo sono costruttivi: servono a chiarire e rendere concrete idee astratte sul moto, la gravità, la luce e i limiti dell'osservazione.

1.1 LA TORRE DI GALILEO

Quando Neil Armstrong e Buzz Aldrin misero piede sul Mare della Tranquillità nel luglio del 1969, il mondo vide l'uomo camminare per la prima volta sulla Luna. Otto anni prima Yuri Gagarin aveva inaugurato l'era dei voli umani nello spazio, e nel giro di pochi anni dodici astronauti americani raggiunsero il nostro satellite, camminando, saltando e guidando veicoli sulla sua superficie.

Durante la missione Apollo 15, nel 1971, l'astronauta David Scott portò con sé una piuma e uno dei suoi martelli per celebrare un'idea antica quanto la scienza moderna. Li lasciò cadere insieme e, nel vuoto lunare, toccarono il suolo nello stesso istante. «**Galileo aveva ragione**», esclamò Scott. Era la dimostrazione, in diretta, dell'esperimento immaginato da Galileo: in assenza di aria, tutti i corpi cadono allo stesso modo, qualunque sia la loro massa.

Sulla Terra, se lasciamo cadere un martello e una piuma dalla stessa altezza, il martello toccherà terra per primo. Questo però avviene solo perché la piuma risente maggiormente della resistenza dell'aria che incontra durante la caduta. Se l'aria non ci fosse, i due oggetti raggiungerebbero il suolo insieme. Il primo a capirlo fu Galileo Galilei, alla fine del Cinquecento. Prima che gli astronauti lo verificassero sulla Luna, Robert Boyle lo aveva verificato verso la metà del Seicento, mettendo oggetti di peso e forma diversi dentro un tubo in cui aveva aspirato l'aria: capovolgendo il tubo, tutti gli oggetti toccano il fondo nello stesso istante.

Ai tempi di Galileo, per spiegare la caduta dei corpi si faceva riferimento alla teoria di Aristotele, secondo cui la velocità di caduta è direttamente proporzionale al peso del corpo. Galileo, però, la pensava diversamente: era convinto che la velocità di caduta di un corpo non dipendesse dal peso. Per dimostrarlo, si narra che abbia fatto cadere due sfere di peso diverso dalla Torre di Pisa (**figura 1**). Tuttavia, è molto probabile che sia giunto a questa conclusione elaborando un esperimento mentale.

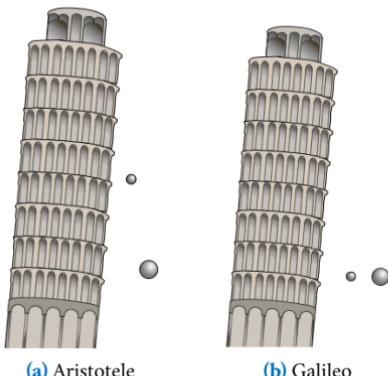


Figura 1: Aristotele contro Galileo.

L'esperimento è geniale nella sua semplicità. Prendiamo due corpi, uno leggero e uno più pesante, e supponiamo che la resistenza dell'aria sia trascurabile, così da non influenzare la loro caduta. Se i corpi pesanti cadessero più velocemente di quelli leggeri, il corpo leggero resterebbe indietro. Questo vuol dire che, legandoli insieme, dovrebbero cadere più lentamente rispetto al solo corpo pesante. Ma

insieme i due corpi pesano di più del corpo pesante da solo, quindi dovrebbero cadere più velocemente. Allora, l'insieme è più veloce o più lento? L'incongruenza mostra chiaramente che l'idea iniziale è sbagliata.

Questa semplice catena di ragionamenti porta a un'unica conclusione: nel vuoto tutti i corpi cadono allo stesso modo, indipendentemente dal loro peso. Galileo non aveva bisogno di salire su una torre. Gli bastò seguire fino in fondo la logica del suo esperimento mentale per scardinare la fisica aristotelica e aprire la strada alla scienza moderna.

1.2 I PIANI INCLINATI DI GALILEO

Ai tempi di Galileo, la teoria del moto accettata era quella di Aristotele. Secondo questa visione, il moto era considerato “deperibile”: un corpo in movimento avrebbe dovuto fermarsi spontaneamente se non spinto da una forza continua. Galileo rifiutò questa idea. Sostenne che il moto non richiede una spinta per continuare e che quello che lo fa cessare non è la mancanza di una forza motrice, ma la presenza di una forza frenante come l'attrito. Per sostenere questa interpretazione, immaginò un esperimento mentale basato sul comportamento dei corpi lungo piani inclinati.

Secondo Galileo, per indagare il «gran libro della natura» non basta le semplici osservazioni: ci vogliono «sensate esperienze», cioè esperimenti progettati *ad hoc*, e «necessarie dimostrazioni», cioè ragionamenti logico-matematici. Galileo era inoltre convinto che **l'universo è scritto in lingua matematica**:

La filosofia [la scienza, diremmo oggi] è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l'universo) ma non si può comprendere se prima non si impara a capire la lingua e a conoscere i caratteri nei quali è scritto. È scritto in lingua matematica, e i caratteri sono triangoli, cerchi e altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile comprenderne umanamente una sola parola; senza questi, è un aggirarsi vanamente in un oscuro labirinto.

Il piano inclinato gli offrì così un modello concettuale per arrivare al **principio d'inerzia**: un corpo non soggetto a forze mantiene il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

Immaginiamo due piani inclinati lisci, uno di fronte all'altro. Un corpo lasciato cadere senza velocità iniziale scende lungo il primo

piano e risale lungo il secondo fino alla stessa altezza di partenza, qualunque sia la sua inclinazione. Se riduciamo progressivamente l'inclinazione del secondo piano, il corpo percorre una distanza sempre maggiore per raggiungere la quota iniziale. Quando l'inclinazione tende a zero, la distanza tende all'infinito. In assenza di attrito, il corpo non smetterebbe mai di muoversi.

Il ragionamento mostrava che il moto non è qualcosa che svanisce spontaneamente, ma qualcosa che si conserva finché nessuna forza lo ostacola. Con un semplice esperimento mentale, Galileo rovesciò così una credenza radicata da secoli e pose le basi della fisica moderna.

1.3 LA NAVE DI GALILEO

«Maledetto sia Copernico! Ha rovinato l'umanità, irrimediabilmente». Nel *Fu Mattia Pascal* Pirandello descrive la vertigine della rivoluzione copernicana: l'idea che la Terra sia in movimento e non al centro dell'universo.

Per secoli si era creduto nel modello geocentrico di Tolomeo e Aristotele, con la Terra immobile. Copernico propone un sistema eliocentrico, ma si scontra subito con una domanda semplice: se la Terra si muove, perché non ce ne accorgiamo?

Qui interviene Galileo. Nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* formula il **principio di relatività**: le leggi della meccanica sono identiche in tutti i sistemi di riferimento inerziali, quelli in cui un corpo non soggetto a forze mantiene la sua quiete o il suo moto uniforme. Nessun esperimento compiuto al chiuso può dire se un sistema è fermo oppure si muove a velocità costante.

Per spiegare l'idea, Galileo usa un'immagine diventata celebre: la nave. Immagina di trovarsi nella stiva di una grande nave che avanza con velocità costante su un mare perfettamente calmo. Se osservi una goccia che cade da un secchio, una farfalla che vola o un pesce che nuota in una vasca, tutto si comporta come quando la nave è ferma. Anche se salti verso prua o verso poppa, la distanza che raggiungi è la stessa in entrambi i casi. Dentro la cabina, ogni fenomeno segue le stesse leggi. Non esiste alcun indizio che permetta di capire se la nave è in quiete o in moto rettilineo uniforme (**figura 2**).

L'intuizione di Galileo è decisiva. Una volta compreso che la Terra può muoversi senza che noi lo percepiamo, cadono molte obiezioni contro l'eliocentrismo. Galileo, per esempio, mostra che un oggetto lanciato in aria ricade nel punto previsto perché somma al suo moto



(a) L'acqua che cade goccia a goccia da un secchio entra nel collo di una bottiglia.

(b) Saltando verso prua o verso poppa con la stessa forza, si raggiunge la stessa distanza.

Figura 2: Il principio di relatività galileiana in azione: non possiamo capire con un esperimento se la nave si muove o è ferma.

verticale anche la velocità orizzontale della Terra: noi e gli oggetti attorno a noi “viaggiamo insieme”, proprio come nella stiva della nave.

L'esplicita adesione di Galileo al sistema copernicano porta però allo scontro con la Chiesa, che ritiene quell'interpretazione incompatibile con le Scritture. Dopo il *Dialogo* (1632) arriva il processo, la condanna in quanto «veemente sospetto di eresia» e l'abiura. Solo nel 1741 il Sant'Uffizio permette di nuovo la pubblicazione delle sue opere e solo nel 1835 i libri di Galileo, assieme a quelli di Copernico e Keplero, vengono definitivamente rimossi dall'Indice dei libri proibiti.

La nave di Galileo è la chiave concettuale che ha cambiato per sempre la nostra idea di movimento: una semplice stanza chiusa, in cui tutto accade come se la stanza fosse ferma, anche quando non lo è.

1.4 IL CANNONE DI NEWTON

Isaac Newton, uno dei più grandi scienziati della storia, nacque nel 1642, pochi mesi dopo la morte di Galileo. Ripartì proprio dalle sue idee. Galileo aveva mostrato che tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione. Newton fece un passo decisivo: capì che quella stessa accelerazione spiega anche il moto della Luna. Per lui, non esistono due fisiche diverse, una terrestre e una celeste. Esiste un'unica legge

che governa ogni movimento. È la **prima legge universale nella storia dell'umanità**.

«Newton è stato il più grande genio e il più fortunato, perché non si può trovare più di una volta un sistema completo del mondo.»
— Joseph Lagrange

Newton propose allora uno dei più celebri esperimenti ideali: il **cannone di Newton**. Immaginò di salire su una montagna molto alta e di porre sulla sua cima un enorme cannone. Se il cannone spara un proiettile con una velocità piccola, il proiettile cade poco lontano. Se la velocità cresce, il punto di caduta si allontana. Se aumenta ancora, il proiettile segue la curvatura della Terra. La superficie terrestre curva sotto di lui con la stessa rapidità con cui lui tende a cadere verso il basso. Il risultato è sorprendente: il proiettile non tocca mai terra e rimane in orbita (**figura 3**).

Il ragionamento mostra che la Luna non è un oggetto misterioso sospeso nel cielo. È un corpo che cade verso la Terra senza mai raggiungerla perché la sua velocità è sufficiente a farle continuamente “mancare il bersaglio”. Il moto orbitale non richiede spinte o motori. Richiede solo una velocità iniziale e una forza di attrazione costante.

Newton trovò così un ponte tra il mondo di Galileo e il mondo delle stelle. La caduta di un sasso e il giro della Luna obbediscono alle stesse leggi. L'universo non è diviso in regioni con regole diverse. È un unico teatro retto dalla stessa fisica.

L'idea di Newton cambiò per sempre la storia della scienza. Bastò la logica di un esperimento mentale per unire Terra e cielo e per mostrare che la natura segue ovunque le stesse leggi.



Figura 3: Il cannone di Newton.

1.5 IL TRENO DI EINSTEIN

«Quando un uomo siede per un'ora in compagnia di una bella ragazza, gli sembra sia passato un minuto. Ma se lo fate sedere su una stufa per un minuto, gli sembrerà più lungo di un'ora. Questa è la **relatività**». Con questa battuta, Albert Einstein, premio Nobel per la fisica, spiegava una delle teorie più rivoluzionarie della scienza moderna: la **teoria della relatività**.

All'inizio del Novecento la fisica viveva una tensione sotterranea. Da un lato c'era la meccanica classica di Newton, costruita sull'idea che le velocità si sommino in modo semplice: per esempio, se cammini dentro un treno in movimento verso la testa del treno, per un osservatore fermo alla stazione la tua velocità si aggiunge a quella del treno. Dall'altro c'erano le equazioni di Maxwell, che descrivevano la luce come un'onda elettromagnetica che viaggia sempre alla stessa velocità.

Le due visioni erano incompatibili. Per Newton la velocità dipende dal punto di vista dell'osservatore. Per Maxwell la luce ha la stessa velocità per chiunque la misuri. Le due idee non potevano convivere.

Per decidere chi avesse ragione, Michelson e Morley misurarono la velocità della luce con grande precisione. Secondo l'idea dell'etere, la luce avrebbe dovuto propagarsi dentro un mezzo meccanico invisibile, un po' come le onde sonore si propagano nell'aria. Muovendosi attraverso questo mezzo, la Terra avrebbe dovuto generare un "vento d'etere" capace di rallentare o accelerare la luce a seconda della direzione.

Il risultato fu netto: la luce ha sempre la stessa velocità, come previsto dall'elettromagnetismo di Maxwell e in contrasto con la fisica classica di Newton. Un risultato che metteva in crisi la struttura stessa della fisica classica. Se la luce non obbediva alle regole classiche, forse erano le regole a dover cambiare.

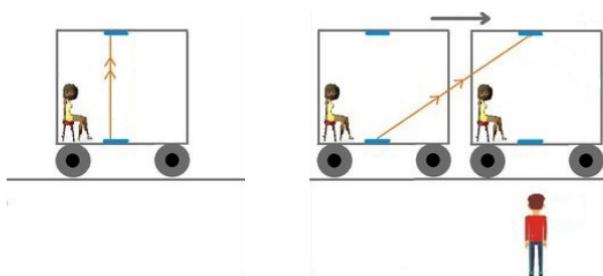
Einstein affrontò il problema con un'idea radicale: le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento e la velocità della luce è costante per qualunque osservatore. Non è la luce ad adattarsi: sono lo spazio e il tempo che devono piegarsi a queste leggi. Così nacque la relatività ristretta, che riprende e amplia l'intuizione galileiana: quello che vediamo e misuriamo dipende dal nostro stato di moto, non perché gli oggetti cambino, ma perché cambiano lo spazio e il tempo stessi.

Per rendere visibile il suo ribaltamento delle idee tradizionali, Einstein immaginò un esperimento mentale che divenne celebre: quello del treno in movimento. Galileo aveva già mostrato che, se ti muovi in modo uniforme, tutto quello che accade intorno a te sembra fermo, come se fossi in una nave che scivola tranquilla sul mare. Einstein riparte da qui, ma porta l'idea molto più lontano.

Immaginiamo un treno che si muove in linea retta, a velocità costante. All'interno del treno puntiamo una torcia verso il soffitto, accendiamola e misuriamo il tempo impiegato dal raggio di luce per

raggiungerlo. Poi mettiamoci nei panni di un nostro amico, fermo alla stazione. Mentre il treno gli passa davanti, anche lui misura quanto tempo impiega quel raggio per arrivare al soffitto.

Per chi è dentro il treno, il raggio sale in verticale. Per chi guarda da fuori, invece, il raggio segue una traiettoria inclinata. La ragione è che il movimento verticale della luce si combina con il movimento orizzontale del treno. Più il treno è veloce, più l'inclinazione appare evidente a un osservatore esterno (**figura 4**).



(a) Per un osservatore dentro il treno, il raggio di luce sale in verticale.

(b) Per un osservatore fermo alla stazione, il raggio di luce sale inclinato.

Figura 4: La dilatazione relativistica del tempo.

La velocità della luce, però, è la stessa per entrambi gli osservatori. Questa è la regola fondamentale da cui Einstein non volle mai dergare. Dato che il raggio percorre una distanza più corta per chi è nel treno e una più lunga per chi è sulla banchina, l'unico modo per mantenere costante la velocità è che i due tempi misurati risultino diversi. All'interno del treno si registra un intervallo più breve. All'esterno, un intervallo più lungo. Dal punto di vista dell'amico fermo, il nostro orologio "rallenta" perché il treno è in movimento. Dal nostro punto di vista, invece, non rallenta nulla. Per chi osserva da fermo, i tempi misurati da un sistema in movimento risultano dilatati. La velocità provoca una vera e propria **dilatazione dei tempi**.

La conclusione è sconvolgente. A differenza di quanto pensava Newton, **il tempo non è assoluto**. Gli orologi non battono tutti allo stesso modo: un orologio in movimento va più piano di uno fermo. Questa idea, sorprendente ma inevitabile, è uno dei cardini della relatività speciale.

Le idee di Einstein furono confermate da un esperimento che riguarda i **muoni**, particelle elementari che si producono nell'impatto dei

raggi cosmici con gli strati più alti dell'atmosfera. I muoni sono una specie di “elettroni grassi”, dotati di carica negativa e di una massa maggiore dell'elettrone. Sono particelle instabili: in circa due microsecondi decadono e si trasformano in un elettrone e un neutrino. Se usiamo questo dato per calcolare la distanza percorsa nell'atmosfera da un muone prima di disintegrarsi, troviamo un valore di circa mezzo chilometro. Eppure, molti muoni arrivano sulla Terra, anche se l'atmosfera ha uno spessore di circa 15 km. Com'è possibile?

La ragione è che i muoni si muovono così velocemente che la dilatazione del tempo diventa enorme. Per loro il “tic tac” interno scorre più lentamente, e questo permette a un numero sorprendente di muoni di raggiungere il suolo.

L'idea di Einstein spiegava in modo elegante perché l'esperimento di Michelson e Morley avesse dato un risultato nullo. Non esisteva alcun “vento d'etere” perché l'etere non esisteva. Nel 1907 Michelson ricevette il premio Nobel proprio per quell'esperimento fallito. Oggi sappiamo che la luce non è un'onda meccanica ma un campo elettromagnetico oscillante, che non ha bisogno di alcun mezzo per propagarsi.

Nella sua autobiografia, Einstein racconta che a sedici anni si era immaginato **a cavallo di un raggio di luce**, forse il primo dei suoi esperimenti mentali. Se potessimo fare *surf* su un'onda luminosa, pensava, la vedremmo immobile, con i campi elettrici e magnetici congelati. Una situazione impossibile, vietata dalle equazioni di Maxwell e in contrasto con ogni osservazione. Einstein disse poi che in quel paradosso c'era già il seme della relatività speciale.

«Chi avrebbe mai immaginato che un principio semplice come l'invarianza della velocità della luce potesse causare un simile tormento intellettuale a ogni fisico zelante e coscienzioso?». Da quella intuizione sofferta nacque l'idea che avrebbe cambiato per sempre il nostro modo di concepire lo spazio, il tempo e l'universo.

«Se la mia teoria della relatività è valida, la Germania dirà che sono tedesco e la Francia cittadino del mondo. Se è sbagliata, la Francia dirà che sono tedesco e la Germania un ebreo.»

— Albert Einstein

1.6 L'ASCENSORE DI EINSTEIN

Immagina una scuola di dieci piani. Al piano terra, una classe. All'ultimo piano, un'altra. Suona la campanella: le lezioni cominciano. Al piano terra, un'ora tranquilla. Al decimo piano, invece, scorrono cinque ore: lezioni, interrogazioni, ricreazione, compiti, saluti. Poi, di nuovo la campanella. Giù, è passata un'ora. Su, è finita la giornata.

ta. Gli studenti del decimo piano scendono le scale. Incontrano i compagni del piano terra, che sono ancora alla prima ora.

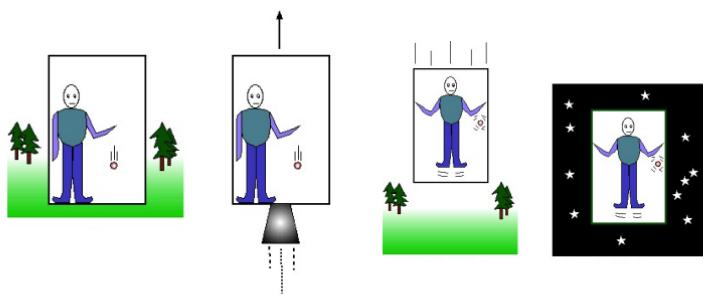
Fantascienza? No. Succederebbe davvero, se la scuola fosse vicino a un buco nero. La relatività generale, infatti, stabilisce che la gravità rallenta il tempo. Chi è più in basso sperimenta un tempo più lento. Chi è più in alto, un tempo più veloce.

Quando Albert Einstein e Charlie Chaplin si incontrarono, Einstein disse a Chaplin: «Quello che ammiro di più della tua arte è la sua universalità: non dici una parola, ma il mondo ti capisce». «È vero», rispose Chaplin, «ma tu sei ancora più grande: il mondo ti ammira, anche se non capisce una sola parola di quello che dici».

Nel 1905 Einstein formulò la teoria della relatività speciale, che descrive le misure effettuate da due osservatori in moto relativo a velocità costante. Che cosa accade, però, quando i due osservatori accelerano uno rispetto all'altro?

«Ero seduto in poltrona quando all'improvviso capii che una persona in caduta libera non avverte il proprio peso. Questo pensiero, così semplice, mi colpì profondamente e mi spinse verso una nuova teoria della gravitazione».

Quello che Einstein chiamò il **«pensiero più felice»** della sua vita è il principio di equivalenza tra la massa inerziale, che si oppone al moto, e la massa gravitazionale, dovuta all'attrazione della Terra o di qualunque altro corpo. In altre parole, Einstein capì che un sistema di riferimento accelerato è equivalente a un sistema di riferimento soggetto alla gravità (**figura 5**).



(a) I corpi cadono allo stesso modo sulla Terra e in un'ascensore che accelera verso l'alto con accelerazione pari all'accelerazione di gravità.

(b) I corpi fluttuano allo stesso modo in un'ascensore in caduta libera sulla Terra e in una navicella spaziale in assenza di gravità.

Figura 5: Il principio di equivalenza di Einstein: un sistema di riferimento accelerato è equivalente a un sistema di riferimento soggetto alla gravità.

Il fatto che tutti i corpi cadano nel vuoto con la stessa accelerazione è rimasto per un paio di secoli davanti agli occhi di tutti, finché è

passato sotto la lente di Einstein. Fu lui a intuire che per un osservatore che cade in un campo gravitazionale è come se il campo gravitazionale non ci fosse.

Cadere in un campo gravitazionale, dunque, produce gli stessi effetti dell'assenza di campo gravitazionale. Per inciso, questo fatto viene usato per simulare l'assenza di gravità nei cosiddetti *voli a zero g*, in cui un aereo viene lasciato cadere (in modo controllato) per alcuni secondi. Le sequenze in assenza di peso del film *Apollo 13* sono state girate proprio in questo modo.

La prima conseguenza del principio di equivalenza è la **dilatazione gravitazionale del tempo**: il tempo, cioè, scorre più lentamente dove la gravità è più forte. In altri termini, un orologio vicino alla Terra ritarda rispetto a un orologio lontano: il tempo scorre più lentamente al piano terra che all'ultimo piano, e il gemello che ha vissuto al mare ritrova il gemello che ha vissuto in montagna un po' più vecchio di lui.

Immaginiamo infatti di essere nella cabina di un ascensore in caduta libera, muniti di un orologio. Cadendo passiamo accanto a due orologi identici al nostro che si trovano uno al decimo e l'altro al primo piano. Dato che la nostra cabina accelera rispetto all'edificio, la sua velocità è più piccola quando passa vicino all'orologio del decimo piano, e più grande quando passa accanto a quello del primo piano.

Dal nostro punto di vista, però, sono i due orologi esterni a muoversi. Entrambi ticchetteranno più lentamente del nostro, per via della dilatazione del tempo prevista dalla relatività speciale. Tuttavia, l'orologio del primo piano, che ci passa accanto più velocemente di quello del decimo piano, scorrerà più lentamente. Insomma: il tempo dell'orologio più vicino alla massa della Terra, cioè dove la gravità è più intensa, scorre più lentamente.

La dilatazione gravitazionale del tempo è stata verificata sperimentalmente. La prima conferma arrivò nel 1959, e fu trovata da Robert Pound e Glen Rebka, che misurarono la differenza nello scorrere del tempo fra il tetto e la base di una torre alta una ventina di metri. Oggi gli esperimenti sono diventati così accurati che si può misurare la differenza nello scorrere del tempo cambiando l'altezza di un orologio di appena un metro.

L'effetto è minuscolo, ma a grandi distanze dalla Terra diventa rilevante. In particolare, il sistema GPS (*Global Positioning System*,

Nel 1971 Joseph Hafele e Richard Keating usarono due orologi atomici molto precisi. Dopo averli sincronizzati, ne lasciarono uno a terra e misero l'altro su un volo di linea intorno al mondo. Al rientro i due orologi segnavano tempi diversi: la differenza corrispondeva esattamente alle previsioni della relatività di Einstein, confermando gli effetti della velocità e della gravità sul tempo.

“sistema di posizionamento globale”) che usiamo per orientarci funziona bene perché tiene conto della relatività generale. Quando cerchiamo la posizione, infatti, il GPS invia un segnale a un sistema di satelliti che orbitano a 20 mila chilometri sopra la Terra: i satelliti lo captano, rilevano la posizione e ce la ritrasmettono. Il segnale ha un ritardo di 38 milionesimi di secondo: sembra poco, ma alla velocità della luce questo ritardo comporta un errore di circa 11,km. **Non riusciremmo a trovare la strada di casa, senza la relatività.**

1.7 IL MICROSCOPIO DI HEISENBERG

All'inizio del Novecento la fisica classica sembrava completa, eppure alcuni fenomeni restavano inspiegabili. Il corpo nero emetteva radiazione in un modo che le formule tradizionali non riuscivano a descrivere. L'effetto fotoelettrico mostrava che la luce, quando colpiva un metallo, poteva strappare via elettroni solo se aveva una certa frequenza, non se era più intensa. E l'atomo, secondo la fisica di allora, sarebbe dovuto collassare su sé stesso, perché un elettrone in rotazione avrebbe dovuto perdere energia e cadere sul nucleo. Queste crepe non erano dettagli: erano segnali che il mondo microscopico obbediva a leggi diverse.

La meccanica quantistica nacque per rispondere a problemi mirati, ma presto divenne chiaro che non si trattava solo di nuove formule. Era un nuovo modo di ragionare, profondo e a tratti vertiginoso. Bisognava accettare che osservare un sistema significa inevitabilmente modificarlo, e che concetti come “posizione” e “velocità” non possono più essere pensati come nella vita quotidiana. Proprio da questa nuova mentalità nacque il principio di indeterminazione di Heisenberg. Il principio non afferma che i nostri strumenti siano imprecisi. Afferma che la natura stessa impone un limite alla conoscenza simultanea di posizione e velocità. Non è un difetto della tecnologia. È il modo in cui il mondo è costruito.

Il **microscopio ideale di Heisenberg** mostra in modo immediato il limite alla misura. Per vedere un elettrone, infatti, bisogna illuminarlo. Se lo illumini con una luce tenue, l'immagine è sfocata e non puoi conoscere la sua posizione con precisione. Se invece usi una luce molto intensa per metterlo meglio a fuoco, quei fotoni così energetici colpiscono l'elettrone e ne cambiano il moto. Migliora la precisione sulla posizione, peggiora quella sulla velocità. L'una cresce mentre l'altra svanisce. È un equilibrio impossibile da rompere.

Le conseguenze sono sconvolgenti. La traiettoria, intesa come una curva continua che unisce tutte le posizioni di un oggetto nel tempo, smette di avere senso nel mondo quantistico. Un elettrone non “sta” in un punto e non “va” lungo una linea: esiste come una nuvola di probabilità che si concentra o si allarga a seconda di come cerchiamo di osservarla. Più cerchiamo di metterlo a fuoco, più il mondo si sfuma.

La meccanica quantistica ha rivoluzionato la nostra comprensione del mondo, mostrando che la realtà, nel suo livello più profondo, è governata da leggi controiduitive e probabilistiche. Quella che era iniziata come una serie di domande specifiche (come spiegare la radiazione del corpo nero, l'effetto fotoelettrico o la stabilità dell'atomo) ha portato a una nuova visione della materia, della luce e persino della conoscenza stessa. I concetti di onda e particella, di osservatore e osservato, di determinismo e indeterminazione, sono stati riformulati alla luce di scoperte che hanno cambiato non solo la fisica, ma anche la filosofia e la tecnologia, e si sono rivelate uno degli sviluppi più fecondi della scienza contemporanea.

IN SINTESI

SCOPERTE

LA NAVE DI GALILEO



Senza guardare fuori,
un uomo a bordo di una nave
in condizioni di mare calmo
non può sapere
se la nave è ferma
o si muove
con moto rettilineo uniforme.



Principio di relatività:
le leggi della fisica
sono le stesse
in tutti i sistemi di riferimento
in quiete
o in moto rettilineo uniforme.

IN SINTESI

SCOPERTE

LA TORRE DI GALILEO



Due corpi,
uno leggero e uno pesante,
cadono insieme.

Se il corpo pesante
cadesse più velocemente,
legandoli insieme
il corpo leggero
dovrebbe rallentarlo.
Ma insieme i due corpi
pesano più
del corpo pesante da solo,
quindi dovrebbero cadere
più velocemente.



**Legge di caduta
dei gravi:** nel vuoto,
tutti i corpi cadono
con la stessa accelerazione,
indipendentemente
dal loro peso.

IN SINTESI

SCOPERTE

I PIANI INCLINATI DI GALILEO



Una pallina che scende lungo un piano inclinato e risale su un altro raggiunge sempre la stessa altezza, qualunque sia l'inclinazione dei piani. Se il secondo piano fosse orizzontale, la pallina continuerebbe a muoversi indefinitamente.

Principio d'inerzia:
un corpo non soggetto a forze mantiene il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

IN SINTESI

SCOPERTE

IL CANNONE DI NEWTON



Immaginiamo di sparare un proiettile orizzontalmente da una montagna molto alta. Se la velocità è sufficiente, la curvatura della Terra fa sì che il proiettile continui a cadere senza mai toccare il suolo, entrando in orbita.



Gravitazione universale: il moto orbitale è una caduta continua attorno a un corpo: la stessa forza che fa cadere a terra gli oggetti guida anche il moto dei pianeti.

IN SINTESI

SCOPERTE

IL TRENO DI EINSTEIN



Dato che la velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento, due lampi simultanei per un osservatore a terra non appaiono simultanei a un osservatore su un treno in movimento. Mentre il treno avanza, infatti, l'osservatore sul treno si avvicina a un lampo e si allontana dall'altro.

Relatività del tempo:
il tempo non è assoluto,
ma dipende dal sistema di riferimento.

IN SINTESI

SCOPERTE

L'ASCENSORE DI EINSTEIN



Un uomo
in un ascensore chiuso
non può capire
se gli oggetti cadono al suolo
perché l'ascensore
è attratto dalla gravità
o perché è accelerato
verso l'alto.
Allo stesso modo,
non sa se gli oggetti fluttuano
perché l'ascensore
è in caduta libera
o perché è in assenza di gravità.



Principio di equivalenza:
la gravità
e l'accelerazione
sono equivalenti.

IN SINTESI

SCOPERTE

IL MICROSCOPIO DI HEISENBERG



Per osservare un elettrone con un microscopio bisogna colpirlo con fotoni ad alta energia. L'urto di questi fotoni ne altera la velocità.



Principio di indeterminazione: la posizione e la velocità di una particella non possono essere entrambe determinate con precisione infinita.

2 | PARADOSSI

Che meraviglia incontrare un paradosso: ora abbiamo qualche speranza di fare progressi.

Niels Bohr

Gli esperimenti mentali di questo capitolo nascono tutti da un **errore secondo**: non descrivono il mondo in modo esatto, ma chiariscono alcune domande fondamentali sulla natura e rafforzano le teorie che cercano di mettere in crisi. Sono tutti **paradossi**, strumenti concettuali che spingono il ragionamento oltre ciò che sembra possibile.

In questo capitolo vedremo sette casi esemplari. I **paradossi di Zenone** mettono in discussione il moto. La **freccia di Lucrezio** esplora i confini dell'universo. Il **secchio di Newton** indaga la rotazione e lo spazio. Il **demone di Laplace** ci spinge a chiederci se il futuro sia già scritto. Il **diavolotto di Maxwell** sfida la seconda legge della termodinamica. Il **gatto di Schrödinger** affronta il problema della sovrapposizione quantistica. Infine, il **paradosso EPR** mette alla prova la correlazione quantistica.

2.1 ACHILLE E LA TARTARUGA

Uno dei paradossi più antichi e famosi della storia è il paradosso di **Achille e la tartaruga**, formulato da Zenone di Elea venticinque secoli fa. Zenone ideò **il primo esperimento mentale della storia**: la gara tra Achille “più veloce”, l’eroe greco dalla leggendaria velocità, e la tartaruga, un animale dalla lentezza proverbiale.

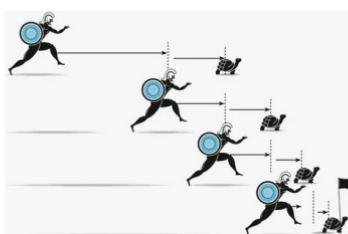


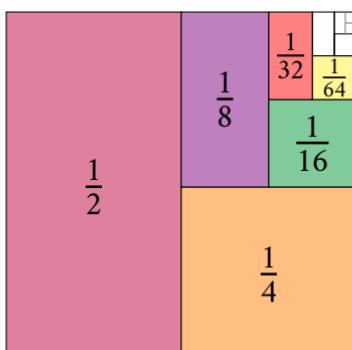
Figura 6: Achille e la tartaruga.

L'argomento di Zenone è il seguente. Se Achille concede alla tartaruga un qualsiasi vantaggio, non riuscirà mai a raggiungerla: infatti deve prima percorrere la distanza iniziale, ma nel frattempo la tartaruga avanza di un nuovo tratto, che Achille dovrà colmare, e così via all'infinito ([figura 6](#)).

Nel racconto *La perpetua corsa di Achille e la tartaruga* (1947), lo scrittore Jorge Borges descrive così il paradosso:

Achille, simbolo di rapidità, deve raggiungere la tartaruga, simbolo di lentezza. Achille corre dieci volte più svelto della tartaruga e le concede dieci metri di vantaggio. Achille corre quei dieci metri e la tartaruga percorre un metro; Achille percorre quel metro, la tartaruga percorre un decimetro; Achille percorre quel decimetro, la tartaruga percorre un centimetro; Achille percorre quel centimetro, la tartaruga percorre un millimetro; Achille percorre quel millimetro, la tartaruga percorre un decimo di millimetro, e così via all'infinito, in modo che Achille corre per sempre senza raggiungerla.

Zenone formulò il paradosso per difendere le tesi del suo maestro Parmenide, che sosteneva che il movimento fosse un'illusione. In altri paradossi, in effetti, Zenone spiega che **il movimento è impossibile**: se lo spazio fosse divisibile all'infinito, infatti, prima di aver raggiunto un certo punto Achille dovrebbe coprire la metà della distanza che lo separa dal traguardo, poi la metà della metà della distanza rimanente, e così via all'infinito, senza poter mai completare il processo. Insomma, Achille e la tartaruga non potrebbero neppure spostarsi lungo il percorso di gara.



[Figura 7:](#) La somma di tutti i pezzi fa 1.

Diogene il Cinico osservò beffardo che il paradosso «si risolve camminando» (*solvitur ambulando*). Aristotele invece confutò l'argomento sostenendo che Zenone immaginava qualcosa che non esiste, cioè un infinito in atto: in questo caso, gli infiniti tratti che Achille dovrebbe percorrere per raggiungere la tartaruga. Secondo Aristotele, però, l'infinito esiste solo in potenza, e quindi Achille non avrebbe problemi a vincere la gara.

Per confutare matematicamente il paradosso è stato necessario aspettare molti secoli, finché all'argomento fu applicata la nozione di **convergenza di una serie**. La premessa del paradosso di Zenone, infatti, è che sommando infiniti termini si ottenga sempre un risultato infinito, indipendentemente dalla grandezza degli addendi. L'argomento di Zenone prova invece che la somma di infiniti termini può, anche se non necessariamente deve, essere finita.

Il primo a notarlo esplicitamente fu Gregorio di San Vincenzo, che nel 1647 ridusse la confutazione del paradosso al calcolo del valore finito della seguente somma:

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \cdots + \frac{1}{2^n} + \cdots = 1$$

Per dimostrarlo, basta partire da un quadrato di area pari a 1, dividerlo a metà in due rettangoli (pari a 1/2 ciascuno), poi dividere a metà uno dei due rettangoli in due quadratini (pari a 1/4 ciascuno), e così via: il procedimento frattale continua alternando rettangoli e quadrati sempre più piccoli, ma sempre contenuti nel quadrato originario. Il limite della somma è dunque pari all'intero quadrato, cioè 1 ([figura 7](#)). Se il quadrato fosse un tramezzino, l'argomento mostra che potremmo mangiarne infinite fette sempre più piccole: alla fine, avremmo mangiato l'intero tramezzino.

La soluzione di Gregorio di San Vincenzo richiama il mito egizio dell'**occhio di Horus**: per vendicare l'uccisione del padre Osiride, il dio Horus affrontò suo zio Seth e, nello scontro, perse un occhio che si frantumò in sei parti. A ognuna di queste parti fu associata una frazione sempre più piccola: un mezzo, un quarto, un ottavo, un sedicesimo, un trentaduesimo e un sessantaquattresimo. La ricostruzione dell'occhio diventa così la somma di queste frazioni, che si avvicinano all'intero senza raggiungerlo perché manca il frammento finale. La suddivisione tradizionale dell'occhio corrisponde alla somma ([figura 8](#)):

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} + \frac{1}{64} = \frac{63}{64}$$



Figura 8: L'occhio di Horus e le sei frazioni associate ai suoi frammenti.

Anche Gregorio usa una sequenza di termini sempre più piccoli per mostrare che il totale può avvicinarsi a un valore pieno. L'idea di

fondo è la stessa: sommare contributi via via minori può portare a sfiorare l'intero.

Un altro argomento di Zenone contro il movimento è il **paradosso della freccia**. La freccia sembra muoversi, ma in realtà è immobile: in ogni istante occupa solo uno spazio pari alla sua lunghezza, e dato che il tempo è composto da singoli istanti, la freccia rimane ferma in ognuno di essi, e dunque è sempre immobile. «**La freccia e Achille sono i primi personaggi kafkiani della letteratura**», dirà Borges. E Italo Calvino si ispirò al paradosso della freccia per il suo racconto *Ti con zero*.

Il paradosso della freccia si risolve con il calcolo infinitesimale, introdotto da Newton e Leibniz nel XVII secolo, secondo cui i singoli istanti di tempo non sono nulli, ma infinitamente piccoli. Quindi in un istante di tempo infinitamente piccolo la freccia si muove percorrendo uno spazio infinitesimo.

Il fascino dei paradossi di Zenone ha travalicato i limiti della matematica. Lewis Carroll, l'autore di *Alice nel paese delle meraviglie*, immaginò che a corsa finita Achille abbia finalmente raggiunto la tartaruga, ma questa lo sottoponga a un nuovo dilemma, che riguarda non più il movimento, ma le regole del ragionamento. L'argomento di Zenone, infatti, può essere usato a sostegno della tesi che niente si può provare e niente si può definire. Ogni prova si deve infatti basare su qualcosa di non provato, che si deve provare a sua volta, e così via. Analogamente, ogni definizione si deve infatti basare su qualcosa di non definito, che si deve definire a sua volta, e così via.

I paradossi di Zenone hanno ispirato libri e film. Tra i libri c'è il *best seller* di Douglas Hofstadter *Gödel, Escher, Bach* (1979), in cui Achille e la tartaruga si accapigliano su argomenti matematici. Tra i film spicca *Achille e la tartaruga* (2008), del regista giapponese Takeshi Kitano, in cui un artista cerca disperatamente di raggiungere il successo che sembra sempre a portata di mano ma si rivela irraggiungibile. E così, da rompicapo logico la gara tra Achille e la tartaruga diventa la metafora di un dramma esistenziale.

2.2 LA FRECCIA DI LUCREZIO

La **freccia di Lucrezio** è uno dei primi esperimenti mentali della storia, ed è opera non di uno scienziato, ma di un poeta: Tito Lucrezio Caro, l'autore del *De rerum natura* (secolo -I), un poema che spiega il mondo attraverso l'atomismo di Epicuro.

Nel poema, Lucrezio immagina di raggiungere il confine estremo dell'universo e di scoccare una freccia oltre quel limite. Allora:

- se la freccia continua a muoversi, quel confine non è un vero confine.
- se invece un ostacolo la ferma, al di là c'è qualcos'altro.

In entrambi i casi, lo spazio è infinito.

La conclusione è sbagliata. L'errore nasce dal pensare al confine dello spazio come a un muro fisico. Questa idea funziona nella vita quotidiana, ma non descrive lo spazio. Lucrezio confonde l'idea di "finito" con quella di "avere un bordo".

Un esempio chiaro è la superficie di una sfera. È finita, ma non ha un bordo. Un insetto può camminare all'infinito senza incontrare un limite, eppure la superficie è limitata. Allo stesso modo, il confine dell'universo, se esiste, potrebbe essere una proprietà geometrica, non un muro da superare.

La freccia di Lucrezio mostra la forza e il rischio delle immagini mentali: guidano il pensiero ma possono ingannare. È un esempio antico di come gli esperimenti mentali mettono alla prova le nostre idee, anche quando conducono a conclusioni sbagliate.

2.3 IL SECCHIO DI NEWTON

Immagina un secchio pieno d'acqua che gira attorno al proprio asse. All'inizio l'acqua resta ferma, ma poi, via via che comincia a ruotare insieme al secchio, la sua superficie si incurva verso l'alto. Perché?

L'esperimento mentale fu proposto da Isaac Newton nel 1689, Newton interpretò questa curva come una prova che l'acqua stia ruotando rispetto allo "spazio assoluto", non rispetto al secchio.

L'errore nasce dall'idea stessa di spazio assoluto. Newton suppone che il movimento debba essere misurato rispetto a uno sfondo fisso, immobile e indipendente da tutto. Ma questa è un'ipotesi, non la conclusione dell'esperimento. Nell'Ottocento Mach mostrerà che la curvatura dell'acqua può essere spiegata senza ricorrere a uno spazio assoluto: quello che conta non è un "fondale immobile", ma la relazione tra l'acqua e la distribuzione di massa dell'universo. Più tardi Einstein andrà oltre, eliminando del tutto lo spazio come contenitore separato e mostrando che lo spazio-tempo è dinamico, modellato dalla materia e dall'energia.

L'immagine del secchio resta importante nella storia della scienza perché solleva una domanda profonda: come possiamo sapere se qualcosa sta davvero ruotando? Newton credette di avere una risposta definitiva, ma la sua spiegazione si basava su un'idea che la fisica moderna ha poi superato.

2.4 IL DEMONE DI LAPLACE

Nella meccanica classica, se conosciamo la posizione e la velocità di una particella e le forze in gioco, possiamo prevedere esattamente come si muoverà e anche come si è mossa. Questa idea si chiama **determinismo**.

Immaginiamo allora un'intelligenza perfetta, capace di conoscere con precisione assoluta la posizione e la velocità di ogni particella dell'universo. Con queste informazioni, il demone potrebbe prevedere il futuro e ricostruire il passato senza alcuna incertezza. In questa visione, tutto ciò che accade sarebbe già scritto nelle condizioni iniziali del cosmo. Il **demone di Laplace**, formulato nel 1814, è uno dei più celebri esperimenti mentali sul determinismo.

L'errore nasce dall'idea che una conoscenza totale sia possibile e che l'universo funzioni come un meccanismo completamente prevedibile. La fisica moderna ha mostrato che questa immagine è troppo semplice. La meccanica quantistica introduce limiti fondamentali alla conoscenza, mentre la teoria del caos rende impossibile prevedere l'evoluzione di molti sistemi anche quando le leggi sono deterministiche.

L'esperimento mentale di Laplace resta però fondamentale: chiarisce che cosa significhi prendere sul serio il determinismo e mostra la fragilità dell'idea di un universo completamente calcolabile.

2.5 IL DIAVOLETTO DI MAXWELL

L'universo sembra "scommettere" sul disordine. Per esempio, se lasci cadere un cucchiaino di colorante in una piscina, le molecole non rimangono raccolte in un grumo: tendono a diffondersi in tutta l'acqua.

I fisici descrivono la tendenza al mescolamento contando i modi possibili in cui le molecole possono disporsi. Esiste una sola configurazione in cui tutte restano ammassate, ma innumerevoli miliardi

in cui si sparpagliano. Dato che l'universo “sceglie” tra tutti gli stati possibili, è quasi certo che evolverà verso quelli più disordinati.

L'idea è formalizzata nella seconda legge della termodinamica, che afferma l'inesorabile crescita dell'**entropia**, cioè del disordine. Ma già nell'Ottocento c'era chi cercava di immaginare modi per infrangerla.

Nel 1867 James Maxwell propose un esperimento mentale. Immaginiamo una scatola di gas divisa in due compartimenti da un muro con una porticina. Il gas è fatto di particelle: alcune si muovono velocemente (quindi “calde”), altre più lentamente (“ fredde”). Ora introduciamo un essere immaginario, un piccolo **diavololetto**, che controlla la porticina. Il diavololetto lascia passare solo le particelle più veloci in un compartimento e solo quelle più lente nell'altro. Dopo un po', un compartimento conterrà quasi solo particelle lente e fredde, l'altro quasi solo particelle veloci e calde. Il sistema, in apparenza, diventa più ordinato: l'entropia sembra diminuita. Maxwell aveva così ideato un paradosso che sfidava la seconda legge della termodinamica ([figura 9](#)).

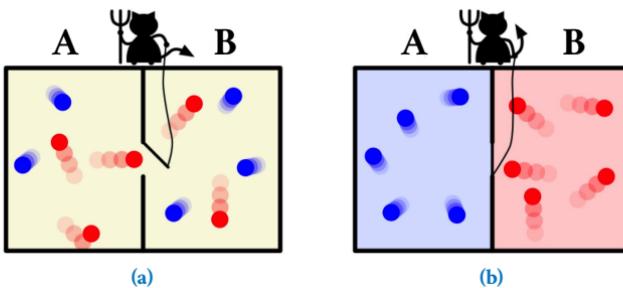


Figura 9: Il diavololetto di Maxwell infrange la seconda legge della termodinamica?

Per risolvere il paradosso potremmo obiettare che il diavololetto deve vedere le particelle per capire quanto sono veloci. E per vederle serve luce. Immaginiamo quindi che la scatola sia illuminata da una lampada esterna, che scalda l'ambiente e aumenta l'entropia.

Problema risolto? Non proprio. Possiamo sempre immaginare che il diavololetto usi una piccola torcia per osservare le particelle senza produrre troppo calore. E il paradosso si ripresenta.

La soluzione è che il diavololetto non agisce gratis:

- per distinguere particelle lente da quelle veloci deve **osservarle**, cioè raccogliere informazione;
- deve **memorizzare** questi dati per decidere quali particelle far passare;
- a un certo punto la memoria si riempie e va **cancellata** per poter continuare a funzionare.

Qui entra in gioco la **termodinamica dell'informazione**. Nel 1948 Claude Shannon, padre della teoria dell'informazione, mostrò che un messaggio contiene tante più informazioni quanto maggiore è l'incertezza che elimina. Nel caso del diavolotto, osservare le molecole significa ridurre l'incertezza sul loro moto: questo accumula informazioni.

Nel 1961 Rolf Landauer dimostrò che **cancellare un bit di informazione ha un costo energetico inevitabile**, che si traduce in un aumento di entropia. Anche un computer, per continuare a calcolare, deve dissipare energia quando cancella o riscrive dati. «L'informazione è fisica», diceva Landauer.

Il diavolotto di Maxwell sembra ridurre l'entropia del gas, ma in realtà il suo stesso funzionamento genera entropia. Osservare e memorizzare costa energia, e cancellare informazioni aumenta l'entropia dell'ambiente. Il guadagno apparente nel gas è quindi più che compensato dal disordine prodotto nel processo. La seconda legge della termodinamica resta salva: **non esiste ordine gratuito**.

2.6 IL GATTO DI SCHRÖDINGER

Agli inizi del Novecento la fisica visse una rivoluzione inattesa. Nel 1900 Max Planck introdusse l'idea che l'energia non fosse continua, ma emessa a pacchetti, i *quanti*. Pochi anni dopo Einstein mostrò che anche la luce ha natura quantizzata, spiegando l'effetto fotoelettrico. Da allora emerse una nuova teoria, la **meccanica quantistica**, che descrive il mondo microscopico con regole diverse da quelle della fisica classica. Una teoria che funziona straordinariamente bene, ma che spesso sfida il senso comune.

Uno dei principi fondamentali della meccanica quantistica è la **sovraposizione degli stati**: un sistema quantistico può trovarsi in più stati contemporaneamente, finché non viene osservato. Per esempio, un elettrone può avere spin orario e antiorario allo stesso

tempo (lo spin è una proprietà interna delle particelle, simile a una minuscola rotazione): solo la misura lo “costringe” a scegliere.

Per mostrare la paradossalità dell’idea, nel 1935 Erwin Schrödinger immaginò un esperimento mentale diventato celebre. Un gatto viene rinchiuso in una scatola insieme a un nucleo radioattivo e a un meccanismo collegato a una fiala di veleno: se il nucleo decade, il meccanismo si attiva e il gatto muore.

Dato che il nucleo è un sistema quantistico, dopo un’ora si troverà in una sovrapposizione di due stati, decaduto e non decaduto. E così, finché la scatola resta chiusa, anche il gatto dovrebbe trovarsi in una sovrapposizione di stati: vivo e morto nello stesso tempo (**figura 10**).



Figura 10: Il gatto di Schrödinger può essere allo stesso tempo vivo e morto?

Qui sta il cuore del paradosso: la meccanica quantistica, che descrive senza problemi elettroni e atomi, sembra applicarsi anche a un oggetto macroscopico come un gatto, che per noi può essere solo vivo o morto, mai entrambe le cose.

Per risolvere il paradosso basta ricordare che il gatto non è isolato. L’ambiente lo tocca in ogni istante, e ogni interazione è come una micro-misura che cancella la sovrapposizione. La sovrapposizione è possibile solo nel mondo microscopico. Appena il sistema diventa grande, l’aria, la luce e le molecole lo “misurano” di continuo, e queste micro-misure distruggono all’istante la sovrapposizione. Nella realtà, quindi, il gatto è sempre o vivo o morto: semplicemente non lo sappiamo finché non apriamo la scatola.

Dopo tanti anni, la comunità scientifica discute ancora sul modo migliore di risolvere paradosso. Sembra che Stephen Hawking, uno dei fisici più famosi di tutti i tempi, abbia detto: «**Ogni volta che sento parlare del gatto di Schrödinger, cerco la mia pistola!**».

Einstein non accettava il carattere probabilistico della meccanica quantistica. «**Dio non gioca a dadi**», diceva nel suo linguaggio colorito (Einstein non credeva in un Dio personale). Tuttavia, dopo oltre un secolo nessun esperimento ha smentito la meccanica quantistica. «Non tocca a noi dire a Dio come deve far andare il mondo», fu la

replica di Bohr. E Stephen Hawking aggiungeva beffardo: «Non solo Dio gioca a dadi, ma a volte li lancia dove non li possiamo trovare». Schrödinger non intendeva proporre un esperimento da realizzare, ma mettere in luce la difficoltà di interpretare la teoria. Il suo gatto è rimasto una metafora potente: ci ricorda che il mondo quantistico non coincide con la nostra intuizione quotidiana, e che tra microscopico e macroscopico c'è un confine sottile, difficile da comprendere.

2.7 IL PARADOSSO EPR

Negli anni '30 del Novecento la meccanica quantistica stava rivoluzionando la comprensione della natura. La teoria descrive con straordinaria precisione il comportamento microscopico di atomi e particelle, seguendo regole spesso controtuitive. Questa nuova visione, molto diversa dalla meccanica classica che governa il mondo macroscopico, sollevò però dubbi profondi sul significato stesso della realtà fisica.

Albert Einstein, che pure aveva contribuito alla nascita della teoria con la spiegazione dell'effetto fotoelettrico, era sempre più scettico: non accettava che il caso e la probabilità fossero al cuore della realtà.

Nel 1935, a Princeton, Einstein lavorava con Boris Podolsky e Nathan Rosen. Insieme firmarono un articolo che poneva una domanda provocatoria: «La meccanica quantistica descrive per intero la realtà fisica?».

Per illustrare i loro dubbi, Einstein, Podolsky e Rosen elaborarono un paradosso. Immaginiamo due particelle che interagiscono e poi si separano: secondo la meccanica quantistica rimangono descritte da un unico stato matematico, collegate (*entangled*). Se si misura lo spin di una, si conosce immediatamente quello dell'altra ([figura 11](#)).

Un'analogia può aiutare: se chiudi due guanti in due scatole, appena ne apri una e trovi quello destro, sai che nell'altra c'è il sinistro. Ma c'è una differenza cruciale: i guanti sono definiti fin dall'inizio, mentre lo stato delle particelle no. È la misura a fissarlo.

Ed ecco il problema. Secondo la relatività, nessuna informazione può viaggiare più veloce della luce. Eppure qui sembra che un'informazione "scatti" istantaneamente da una particella all'altra, anche a distanze enormi. Einstein definì questo effetto «un'inquietante azione a distanza». Per lui era la prova che la meccanica quantistica fosse incompleta: dovevano esistere variabili nascoste che riportassero ordine e determinismo.

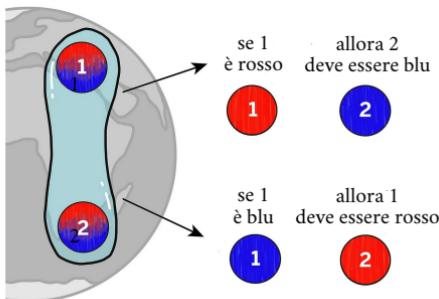


Figura 11: Il paradosso EPR: la meccanica quantistica viola la relatività?

Nasce così il **paradosso EPR** (dalle iniziali dei tre autori): o la meccanica quantistica è incompleta, oppure bisogna accettare che la natura permetta correlazioni “non locali”, cioè a distanza, che sembrano sfidare la relatività.

Ma, paradossalmente, il paradosso EPR **non viola la relatività**. L'*entanglement* non permette infatti di inviare segnali più veloci della luce: le correlazioni compaiono solo quando i risultati delle misure vengono confrontati, e per farlo serve sempre un canale classico che rispetta i limiti relativistici. In altre parole, le due particelle non si influenzano a distanza: formano un **unico sistema descritto da una sola funzione d'onda**.

Per anni il dibattito restò filosofico. Nel 1964, però, il fisico John Bell propose un criterio concreto: le sue diseguaglianze permettono di distinguere tra un universo con variabili nascoste locali (come avrebbe voluto Einstein) e uno governato dall'*entanglement* quantistico.

Gli esperimenti cominciarono negli anni '80 del Novecento, quando Alain Aspect verificò per primo le diseguaglianze di Bell. I suoi risultati mostrarono che il mondo si comporta davvero secondo l'*entanglement* quantistico. In seguito una lunga serie di test, sempre più accurati, confermò il quadro. I più recenti, quelli “a prova di scapatoia”, premiati con il Nobel nel 2022, hanno chiuso definitivamente il dibattito: l'*entanglement* è reale.

Le conseguenze sono enormi.

- La natura non è fatta di pezzi indipendenti che obbediscono a regole locali: esistono correlazioni che sfidano l'intuizione classica.

- L'informazione quantistica diventa una nuova risorsa fisica: i computer quantistici nascono proprio da queste correlazioni non locali.
- Sul piano filosofico, l'immagine deterministica cara a Einstein non è più sostenibile. La meccanica quantistica, con la sua struttura controiduitiva, descrive davvero il mondo.

Nato come un dubbio di Einstein, il paradosso EPR si è trasformato in una delle più forti conferme della meccanica quantistica. Da un problema filosofico è nata una rivoluzione scientifica e tecnologica, che oggi ci costringe a ripensare che cosa intendiamo per realtà.

IN SINTESI

PARADOSSI

IL PARADOSSO DI ACHILLE E LA TARTARUGA



Achille deve raggiungere una tartaruga che ha un piccolo vantaggio.
Quando Achille arriva al suo punto di partenza, la tartaruga è già un po' più avanti.
Quando Achille raggiunge quel nuovo punto, la tartaruga è ancora avanti.
Quindi Achille non la raggiunge mai.

Il percorso si può dividere in infiniti tratti sempre più piccoli.
La somma di questi infiniti tratti è finita, quindi Achille raggiunge la tartaruga.

IN SINTESI

PARADOSSI

LA FRECCIA DI LUCREZIO



Immaginiamo
di scoccare una freccia
verso il confine dell'universo.

Se la freccia lo supera,
allora non esiste un limite.

Se invece
rimbalza contro un ostacolo,
dietro quell'ostacolo
deve esserci qualcosa.
Quindi l'universo è infinito.

Lo spazio
può avere una geometria finita
ma senza confini,
come la superficie di una sfera:
“essere finito” non significa
“avere un bordo”.

IN SINTESI

PARADOSSI

IL SECCHIO DI NEWTON



Immaginiamo un secchio pieno d'acqua appeso a una corda e messo in rotazione. Anche l'acqua finisce per ruotare e la sua superficie si incurva. Questo effetto si vede senza riferimenti esterni, quindi il moto rotatorio richiede uno spazio assoluto.

Secondo la teoria della relatività, la curvatura dell'acqua dipende dall'accelerazione nel proprio spazio-tempo, non da uno spazio assoluto che non esiste.

IN SINTESI

PARADOSSI

IL DIAVOLETTO DI MAXWELL



Un diavoletto apre e chiude una porticina tra due contenitori di gas, lasciando passare da una parte solo le molecole più veloci e dall'altra quelle più lente, ottenendo così una differenza di temperatura e violando il secondo principio della termodinamica.

Un essere del genere non può agire senza pagare un costo energetico o informativo, altrimenti violerebbe il secondo principio della termodinamica.

IN SINTESI

PARADOSSI

IL DEMONE DI LAPLACE



Un essere capace di conoscere la posizione e la velocità di tutte le particelle dell'universo potrebbe prevedere il futuro in ogni dettaglio.

Il caos rende imprevedibili anche i sistemi classici, e la meccanica quantistica limita la conoscenza di posizione e velocità..

IN SINTESI

PARADOSSI

IL GATTO DI SCHRÖDINGER



Immaginiamo di mettere un gatto in una scatola insieme a un meccanismo che può ucciderlo a seconda del decadimento di un atomo. Finché non apriamo la scatola, il gatto è contemporaneamente vivo e morto, il che è assurdo.

In realtà, il gatto è fatto di moltissime particelle che interagiscono continuamente tra loro e con l'ambiente. Queste interazioni “misurano” di continuo lo stato dell’atomo. Le proprietà macroscopiche (vita o morte del gatto) non sono in sovrapposizione.

IN SINTESI

PARADOSSI

IL PARADOSSO DI EINSTEIN-PODOLSKI-ROSEN



Immaginiamo due particelle correlate che vengono separate a grande distanza. Se misuriamo una proprietà di una particella, conosciamo immediatamente quella dell'altra. Questa "azione a distanza" sembra violare la relatività.

In realtà non c'è alcuno scambio di informazione, quindi la teoria della relatività non è violata.

Parte II

FILOSOFIA

3 | ETICA E GIUSTIZIA

Pensare è fare esperimenti.

William James

La filosofia usa gli esperimenti mentali per mettere alla prova le nostre intuizioni. Ogni scenario immaginario apre una nuova prospettiva e può cambiare il modo in cui definiamo quello che è giusto, lecito o equo. Questi esercizi ci invitano a ripensare le nostre convinzioni. La filosofia non cerca risposte definitive. Cerca chiarezza. E a volte la ottiene proprio immaginando mondi che non esistono.

Il capitolo inizia con tre casi di filosofia morale. **L'anello dell'invisibilità** mostra il comportamento umano senza controlli esterni. **L'esperimento del carrello**, con le sue numerose varianti, mette l'uomo davanti a scelte difficili sulla vita e sulla morte. La **macchina dell'esperienza** oppone il piacere illusorio e la dura realtà.

Seguono due esperimenti di diritto. Il **violinista di Thomson** distingue obblighi morali e giuridici. Il **velo d'ignoranza** invita a immaginare una società giusta.

3.1 L'ANELLO DELL'INVISIBILITÀ

Nella *Repubblica*, Platone racconta il mito di Gige, un pastore della Lidia (un antico regno dell'odierna Turchia) che trova un anello capace di renderlo invisibile. Gige approfitta del potere dell'anello per sedurre la regina, uccidere il re e salire al trono.

Il punto centrale del mito non è la magia dell'anello, ma la domanda che lo accompagna. Come si comporterebbe un uomo se fosse certo di non essere visto, giudicato o punito? Il mito suggerisce che anche il più giusto degli uomini finirebbe per commettere ingiustizie, perché l'apparire virtuosi conta più dell'esserlo davvero.

L'esperimento mentale ci mette davanti a un dubbio profondo e scomodo: l'etica nasce dentro di noi o nasce dal controllo sociale? E

la giustizia è una scelta sincera o solo una strategia per vivere insieme? Platone non dà una risposta definitiva, ma ci invita a osservare i nostri comportamenti quando nessuno ci guarda. È in quei momenti che si vede chi siamo davvero.

*L'anello di Gige
è un topos della
letteratura.*

*Tolkien lo
riprenderà nel
Signore degli
Anelli: l'idea di
un potere che
nasconde e
corrompe è
troppo ghiotta
per non essere
riusata.*

3.2 L'ESPERIMENTO DEL CARRELLO

Immagina di trovarti accanto ai binari di una ferrovia. Davanti a te c'è un carrello fuori controllo. Corre veloce e nessuno può fermarlo. Più avanti, sul binario principale, cinque uomini sono legati e non possono spostarsi. Se il carrello continua dritto, li investirà (**figura 12**).

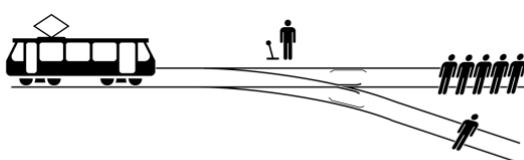


Figura 12: Il problema del carrello.

A pochi passi da te c'è una leva. Se la tiri, il carrello verrà deviato su un binario laterale. Su quel binario però c'è un uomo, anche lui incapace di muoversi. Devi decidere: se non tocchi la leva muoiono cinque uomini, se la tiri ne muore uno. Che cosa fai?

L'esperimento, ideato nel 1967 da Philippa Foot e ripreso nel 1976 da Judith Thomson, è oggi conosciuto come l'**esperimento del carrello** ed è l'esperimento mentale più famoso dell'etica contemporanea. L'esperimento ci mette davanti a una domanda diretta: è giusto salvare più vite anche se questo significa causare la morte di qualcuno?

Alcuni pensano che si debba ridurre il danno totale e scegliere l'opzione che salva più persone. Altri sostengono che non si possa mai causare direttamente la morte di un uomo, anche se questo permette di salvarne altri. Altri ancora si collocano in posizioni intermedie.

Una variante dell'esperimento riguarda l'**identità dell'uomo sul binario laterale**. Immagina che l'uomo legato sul binario deviato non sia un passante qualunque, ma il responsabile stesso della situazione, il folle che ha manomesso i freni del carrello e legato gli altri cinque. Se fosse lui a trovarsi sul binario laterale, la scelta cambierebbe?

Molti che inizialmente scelgono di non tirare la leva, sostenendo che non si possa mai causare direttamente la morte di un uomo, cambiano idea quando scoprono che l'uomo sul binario laterale è il colpevole. In questo caso, tirare la leva sembra più accettabile, perché non si sacrifica un innocente, ma si colpisce chi ha causato il pericolo.

L'esperimento del carrello ha molte varianti. Una delle più celebri è quella dell'**uomo corpulento**. Immagina un ponte sopra i binari. Accanto a te c'è un uomo molto pesante. Se lo spingi giù, il suo corpo fermerà il carrello, salvando i cinque uomini più avanti. Ma l'uomo morirà. Se non lo spingi, moriranno gli altri cinque.

Sorprendentemente, molte persone che tirerebbero la leva nel primo scenario non spingerebbero l'uomo nel secondo. Eppure l'esito è lo stesso: un individuo muore per salvarne cinque. Perché allora le nostre intuizioni divergono?

La differenza sembra paradossale. Azionare una leva per deviare un carrello appare un gesto "indiretto", mentre spingere qualcuno con le proprie mani ci coinvolge fisicamente e moralmente in modo più immediato. Quasi tutti proviamo una forte resistenza a compiere un'azione che sembra troppo vicina a un'uccisione diretta, anche se il risultato è lo stesso. La variante mostra che, per molti di noi, non conta solo quante vite vengono salvate, ma anche come vengono salvate.

Un'altra variante dell'esperimento del carrello è il **dilemma del chirurgo**. Immagina un chirurgo con cinque pazienti in fin di vita. Ognuno ha bisogno urgente di un organo diverso. Senza quei trapianti moriranno tutti. Un giorno entra in ambulatorio un uomo sano, venuto per un controllo di routine. Il chirurgo scopre che questo uomo ha gli organi compatibili con i cinque pazienti. A questo punto nasce il dilemma: è giusto sacrificare un uomo innocente per salvarne cinque?

L'esperimento mette in luce il contrasto tra una logica utilitarista, che guarda al numero delle vite salvate, e una logica deontologica, che difende il valore assoluto di ogni individuo.

L'esperimento del **bambino sacrificato**, tratto da un racconto di Ursula Le Guin del 1973, porta il problema al limite. Immagina un bambino che soffre in modo insopportabile. Il suo sacrificio, però, porta gioia, salute e benessere a milioni di persone. La domanda è semplice e terribile: sarebbe giusto farlo?

Secondo l'utilitarismo, il sacrificio del bambino potrebbe essere giustificato, perché aumenta la felicità complessiva. Ma le intuizioni morali comuni lo rifiutano: sacrificare un innocente viola principi di giustizia, dignità e diritti individuali.

C'è un'altra variante, diversa dalle precedenti: non riguarda la sofferenza inflitta nel presente, ma i crimini che verranno. È il caso del **giovane Hitler**.

Immagina di tornare indietro nel tempo e di incontrare un ragazzo in una birreria tedesca. Il ragazzo non ha commesso alcun crimine e vuole diventare un artista. Si chiama Adolf Hitler. Se lo lasci vivere, in futuro causerà milioni di morti. Che cosa fai? Lo uccidi, sapendo che il suo sacrificio salverà milioni di vite? Oppure lo lasci vivere, dato che non si può condannare qualcuno per crimini che non ha ancora commesso?

L'esperimento del carrello non ha una soluzione definitiva. La sua forza sta nella struttura essenziale: non parla di leggi, religioni o culture, ma di una scelta concreta. Serve per osservare come ragioniamo, che cosa consideriamo "giusto" o "sbagliato". Mostra che la morale non è fatta solo di regole: dipende anche da intuizioni ed emozioni. E soprattutto rivela che, di fronte a scelte difficili, spesso non conosciamo con chiarezza le ragioni che ci guidano.

3.3 LA MACCHINA DELL'ESPERIENZA

Immagina una macchina capace di offrirti esperienze perfette: felicità continua, piaceri, successi, soddisfazioni totali. Tutto sarebbe indistinguibile dalla realtà. Potresti passare la vita credendo che sia tutto vero, senza dolore né frustrazione. L'alternativa è restare nella vita reale, con i suoi rischi, fallimenti e sofferenze. Che cosa scegli?

Il film Vanilla Sky (2001) riprende il tema della macchina dell'esperienza: una vita perfetta ma non reale, finché nasce il desiderio della verità.

La maggior parte delle persone rifiuta la macchina. L'esperimento, ideato da Robert Nozick nel 1974, mostra che per molti una "buona vita" non è fatta solo di piaceri, ma anche di verità e autenticità. È anche una critica all'utilitarismo edonistico, secondo cui la felicità è solo la somma dei piaceri.

La macchina dell'esperienza mostra che, per molti, la verità conta quanto la felicità stessa, se non di più.

3.4 IL VIOLINISTA DI THOMSON

Immagina di svegliarti in un letto sconosciuto. Accanto a te c'è una persona addormentata: è un violinista molto famoso. Poi noti qualcosa di incredibile. Siete collegati: il suo corpo è unito al tuo da tubi che attraversano le vene.

Arriva qualcuno e ti spiega la situazione. Il violinista è gravemente malato e può sopravvivere solo se il tuo corpo filtra il suo sangue. Non sei stato informato né consultato. Una società di appassionati di musica ti ha collegato a lui mentre eri incosciente. Dovrai rimanere così per nove mesi. Dopo quel periodo lui sarà guarito e potrai scollegarti senza rischi.

A questo punto emerge la domanda centrale dell'esperimento mentale formulato da Judith Thomson nel 1971: **sei moralmente obbligato a restare attaccato al violinista?** In altre parole, **aiutare un'altra persona è sempre un obbligo morale, o è una scelta che deve rimanere libera?** Nove mesi non sono casuali: Thomson propone l'esempio in analogia con l'interruzione volontaria della gravidanza.

Anche se scollegarti significa causare la morte del violinista, Thomson suggerisce che non sei moralmente obbligato a sacrificare il tuo corpo. Il violinista non è un uomo cattivo. Non ha fatto nulla contro di te. Eppure la scelta resta tua, perché è il tuo corpo a essere coinvolto. Nessuno può pretendere che tu rinunci alla tua libertà per mesi, anche se questo salverebbe un'altra vita.

La forza dell'esperimento sta nel fatto che non cerca di dare una risposta universale. Vuole invece mostrare che la domanda «chi ha diritto al corpo di chi?» è più complessa di quanto sembri.

3.5 IL VELO D'IGNORANZA

Immagina di dover progettare da zero le regole di una società. Devi scegliere diritti, leggi, tasse e opportunità. Puoi ragionare con calma, ma c'è una condizione decisiva: non sai chi sarai quando quelle regole entreranno in vigore. Potresti essere ricco o povero, sano o malato, giovane o anziano. Non conosci nulla della tua posizione futura. È come essere dietro a una "tenda mentale" che nasconde ogni informazione personale. John Rawls, nel 1971, chiama questa tenda "velo d'ignoranza" ([figura 13](#)).

L'idea è potente: **se non sai chi sarai, quali regole sceglierai per essere sicuro che la società sia giusta?** Non puoi costruire una



Figura 13: Il velo dell'ignoranza: scegliere regole giuste senza sapere quale ruolo si ricoprirà.

società che favorisce solo un gruppo di persone, perché potresti non farne parte. Non puoi accettare grandi ingiustizie, perché potresti esserne vittima. L'esperimento ti costringe a ragionare in modo imparziale.

Rawls sostiene che, dietro il velo d'ignoranza, quasi tutti sceglierrebbero una società con diritti fondamentali garantiti e con condizioni dignitose anche per chi nasce nella posizione più fragile. È una scelta prudente: se non sai dove finirai, vuoi un mondo che non lasci indietro nessuno.

Un esempio reale si trova nell'Italia del dopoguerra. Il Paese era distrutto e nessuno poteva prevedere quale ruolo avrebbe avuto nel futuro democratico. Chi scriveva la Costituzione non sapeva se le sue idee sarebbero state maggioranza o minoranza, né se la nuova Italia avrebbe favorito il suo partito o le sue posizioni sociali.

Nell'incertezza, la scelta più razionale era scrivere regole che proteggessero tutti: diritti inviolabili, libertà personali, pari dignità. Senza chiamarlo così, stavano ragionando in uno stato simile al velo d'ignoranza: dato che non potevano prevedere il futuro, gli autori della Costituzione costruivano un sistema giusto per chiunque, forte o vulnerabile.

Il velo d'ignoranza è uno degli esperimenti mentali più celebri della filosofia politica. Non richiede strumenti complessi, ma solo immaginazione e un cambio di prospettiva. Ti chiede di mettere da parte te stesso, anche solo per un momento, e di chiederti: **quali regole accetterei se domani potessi nascere in qualunque posto della società?**

IN SINTESI

ETICA E GIUSTIZIA

L'ANELLO DELL'INVISIBILITÀ



Immaginiamo
di avere un anello
che ci rende invisibili.
Possiamo fare qualunque cosa
senza essere scoperti.
Rispetteremmo ancora
le regole morali?

Un'azione è davvero etica
se nasce da dentro di noi,
non dalle pressioni esterne.

IN SINTESI

ETICA E GIUSTIZIA

L'ESPERIMENTO DEL CARRELLO



Un carrello fuori controllo corre sui binari.
Davanti ci sono cinque uomini.
Possiamo deviarlo azionando una leva, ma sul binario laterale c'è un uomo.
Dobbiamo scegliere se intervenire o non fare nulla.

L'esperimento indaga le conseguenze delle nostre azioni e le responsabilità morali.

IN SINTESI

ETICA E GIUSTIZIA

LA MACCHINA DELL'ESPERIENZA



Una macchina può darti felicità perfetta: successi, piaceri, soddisfazioni. Tutto è simulato, ma identico al reale. L'alternativa è la vita vera: rischi, fallimenti e dolore.

Quasi tutti rifiutano la macchina. Non vogliamo solo piacere: vogliamo realtà, autenticità e una vita vera. L'esperimento mostra i limiti dell'utilitarismo edonistico.

IN SINTESI

ETICA E GIUSTIZIA

IL VIOLINISTA DI THOMSON



Immaginiamo di svegliarci attaccati a un violinista gravemente malato. Il suo corpo usa il nostro per vivere. Non abbiamo scelto questa situazione, ma scollegarci lo ucciderebbe.

Aiutare qualcuno non implica essere obbligati a usare il proprio corpo contro la propria volontà.

IN SINTESI

ETICA E GIUSTIZIA

IL VELO DELL'IGNORANZA



Immaginiamo di dover scegliere le regole di una società. Ma siamo dietro un "velo d'ignoranza": non sappiamo chi saremo in quella società. Ricchi o poveri, forti o deboli, sani o malati.

Senza sapere il nostro ruolo, sceglieremo regole giuste per tutti. L'equità nasce quando nessuno può favorire sé stesso.

4

SCELTE E DECISIONI

L'economia non descrive il mondo: lo immagina.

Amartya Sen

L'economia usa gli esperimenti mentali per capire come reagiscono le persone quando devono prendere decisioni difficili. L'economia, infatti, non descrive solo numeri. Descrive scelte. E spesso le scelte migliori emergono proprio quando immaginiamo mondi più semplici del nostro. Ogni scenario immaginario permette di isolare un'idea e di vedere come funziona senza il "rumore" del mondo reale.

Il capitolo inizia con il **dilemma del prigioniero**, che mette in luce il rapporto tra cooperazione e interesse personale, prosegue con il **mercato ideale**, un modello semplificato per osservare i prezzi, e si conclude con l'**economia di Robinson Crusoe**, che analizza le scelte di produzione e consumo in un contesto ordinato.

4.1 IL DILEMMA DEL PRIGIONIERO

Dopo la seconda guerra mondiale, le due superpotenze vincitrici, gli Stati Uniti e l'Unione Sovietica, entrarono in una dura competizione politica e militare. La posta in gioco era il primato sul mondo. La tensione che ne risultò, durata circa mezzo secolo, non si concretizzò mai in un conflitto militare diretto, tanto che si usa l'espressione "guerra fredda" per indicarla.

Presto iniziò una micidiale corsa agli armamenti. I sovietici costruirono una loro bomba atomica, dopo quella che gli americani avevano sganciato su Hiroshima e Nagasaki. In risposta, gli americani costruirono un'arma nucleare ancora più distruttiva, la bomba all'idrogeno, subito emulati dai sovietici.

Le due superpotenze arrivarono a spendere ciascuna una cifra vicina ai 100 miliardi di dollari l'anno in armi, fino a raggiungere una

capacità di distruzione superiore a quella necessaria per radere al suolo l'intera Terra. Si instaurò un "equilibrio del terrore": ciascuna superpotenza era trattenuta dall'attaccare l'altra dalla prospettiva di una guerra nucleare che avrebbe distrutto il mondo. L'economia degli Stati Uniti fu in grado di sostenere lo sforzo, mentre l'Unione Sovietica non fu in grado di reggere il confronto e collassò (anche) sotto il peso dei problemi finanziari.

Perché le due superpotenze, anziché seguire la strada della corsa al riarmo, non adottarono una politica di disarmo bilanciato e di coesistenza pacifica? In fondo, se entrambe le superpotenze avessero scelto il disarmo, nessuna avrebbe avuto un vantaggio sull'altra e tutti si sarebbero trovati in condizioni di parità. Ce lo spiega il **dilemma del prigioniero**, un gioco proposto da Merrill Flood e Melvin Dresher nel 1950. Il titolo e la versione attuale si devono ad Albert Tucker.

Il dilemma è il seguente. La polizia arresta due sospettati, Bonnie e Clyde. Dato che non ha prove sufficienti per incastrarli, li rinchiude in due celle diverse e li interroga, offrendo loro la scelta seguente. Se uno confessa e l'altro non confessa, chi non ha confessato sconterà dieci anni di carcere mentre l'altro sarà libero. Se confesseranno entrambi, allora la polizia li condannerà a cinque anni di carcere. Se invece entrambi non confesseranno, la pena da scontare sarà pari a un anno di carcere (**figura 14**). Nessuno dei due prigionieri conosce la scelta dell'altro.

I prigionieri sono davanti a un dilemma. Se potessero concordare di non confessare (in modo vincolante), allora ciascuno verrebbe condannato a un solo anno di carcere. Ma non possono comunicare e, anche se potessero farlo, potrebbero fidarsi l'uno dell'altro?

Per ciascun prigioniero la scelta più conveniente è confessare. Infatti se Bonnie confessa, a Clyde conviene confessare perché così scontrebbe cinque anni di carcere, come Bonnie, anziché dieci. Se invece Bonnie non confessa, a Clyde conviene a maggior ragione confessare

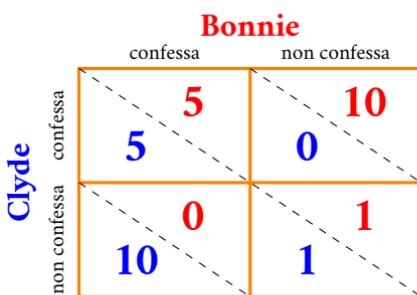


Figura 14: Il dilemma del prigioniero.

perché così facendo sarebbe libero, mentre Bonnie sconterebbe dieci anni di carcere. Dunque i prigionieri confessano e scontano entrambi cinque anni di carcere. In questo modo si realizza l'**equilibrio di Nash**, definito da John Nash nel 1950: nessuno dei due soggetti cambierebbe la sua decisione se scoprissesse la decisione dell'altro, né avrà motivo di pensare, anche con il senno di poi, di aver potuto fare una mossa migliore.

L'aspetto paradossale della situazione è che, pur essendo quella ottimale indipendentemente dalla scelta dell'avversario, non è però la migliore delle situazioni possibili: se i prigionieri non confessassero, infatti, sconterebbero entrambi un solo anno di carcere, e non cinque. In altre parole, il dilemma del prigioniero porta a un equilibrio che non è l'**ottimo paretiano**, definito da Vilfredo Pareto nel 1896: si verifica quando non si può migliorare la condizione di un soggetto senza peggiorare la condizione di un altro.

Se pensiamo agli Stati Uniti e all'Unione Sovietica come ai due prigionieri, alla confessione come all'armamento nucleare e alla negazione come al disarmoilaterale, il dilemma descrive come per le due nazioni fosse inevitabile al tempo della guerra fredda la corsa agli armamenti, anche se questo risultato non era ottimale per nessuna delle due superpotenze (e per il mondo intero).

In economia, il dilemma del prigioniero si applica agli **acquisti online**. Nel commercio elettronico da un lato c'è chi mette merce sul mercato e dall'altro chi desidera acquistarla. Se ciascuno cerca la strategia ottimale, indipendentemente dalle azioni dell'altro, il venditore e il compratore si trovano di fronte a un paradosso: al compratore conviene non pagare perché se il venditore non gli manda la merce non perde nulla e se gliela manda ci guadagna, mentre al venditore conviene non spedire la merce ordinata perché se l'acquirente non paga non perde nulla e se paga ci guadagna.

Paradossalmente, sembra che, nel contesto degli acquisti online, la soluzione migliore sia che il compratore non paghi e il venditore non mandi la merce. Tuttavia, se tutti adottassero questa strategia, non ci sarebbe alcun mercato.

La soluzione del paradosso è che il ragionamento funziona solo per un solo acquisto o una sola vendita. Alla lunga, barare non conviene, perché il compratore e il venditore vengono espulsi dal mercato. Se si vuole stare sul mercato, bisogna cooperare.

Un'altra applicazione del dilemma del prigioniero alla vita reale è il doping nello sport. Due atleti in competizione possono doparsi

per aumentare le loro prestazioni. Se nessuno dei due si dopa, nessuno ha un vantaggio; se solo uno lo fa, l'atleta che si dopa ha un vantaggio, ottenuto correndo pericoli medici e legali; se entrambi gli atleti si dopano, il vantaggio si annulla e rimangono solo i pericoli. In quest'ultimo caso, entrambi gli atleti sono messi peggio che se nessuno dei due si fosse dopato.

In definitiva, il dilemma del prigioniero dimostra che a volte è **meglio cooperare che contrapporsi**. Come diceva John Nash, «Per cambiare, bisogna agire insieme».

4.2 IL MERCATO IDEALE

Immagina una città dove ogni bene è prodotto da mani esperte e ogni compratore sceglie con cura quello che acquista. Tutti conoscono i prezzi, la qualità e il valore reale di ogni cosa. Ogni compratore trova sempre il prodotto migliore al prezzo più basso, e ogni venditore offre sempre il prezzo più competitivo. Nessuno inganna, nessuno approfitta: tutti seguono le stesse regole e la concorrenza è perfetta.

Il mercato ideale appena descritto è stato inventato da un economista, Léon Walras, nel 1874, per capire come dovrebbe funzionare un mercato se fosse perfetto. In questo mercato ideale, i prezzi riflettono il valore reale dei beni, nessuno spreca risorse e ognuno ottiene quello che vuole, nei limiti delle proprie possibilità.

Nella realtà, i mercati non funzionano così: alcuni sanno più degli altri, i prezzi non sono sempre giusti e spesso qualcuno può influenzarli. Il modello del mercato perfetto serve a chiarire queste situazioni più complesse: semplificando, permette di isolare le regole di base e vedere come si formano le scelte, i prezzi e la concorrenza. Confrontando il modello ideale con il mondo reale, diventa più facile capire dove i mercati falliscono e perché.

4.3 L'ECONOMIA DI ROBINSON CRUSOE

Su un'isola deserta vive un naufrago: Robinson Crusoe. Le risorse sono poche e ogni giorno Crusoe deve scegliere come usare il tempo: pescare, raccogliere noci di cocco, costruire un rifugio o riposare. Ogni decisione esclude le altre e ha conseguenze immediate e future.

Quando sull'isola arriva Venerdì, Crusoe non è più solo. I due possono dividere i lavori e scambiarsi quello che producono, rendendo le giornate più leggere e il raccolto più abbondante.

L'esperimento mentale, proposto da Frédéric Bastiat nel 1848 e ispirato al personaggio letterario di Robinson Crusoe, mostra, in forma semplificata, i principi fondamentali dell'economia: scelta ottimale, costo-opportunità, produzione, consumo, risparmio, investimento, commercio, equilibrio.

Anche in un contesto semplice, l'analisi delle scelte di Crusoe evidenzia come la scarsità, i costi delle decisioni e la cooperazione guidino il comportamento economico e determinino il benessere complessivo.

IN SINTESI

SCELTE E DECISIONI

IL DILEMMA DEL PRIGIONIERO



Due prigionieri non possono parlare tra loro. Ognuno può scegliere se collaborare o tradire l'altro. Se potessero fidarsi l'uno dell'altro, entrambi guadagnerebbero collaborando.

Senza fiducia, ognuno teme che l'altro lo tradisca. Così la scelta più sicura sembra tradire, e il risultato è peggiore per entrambi.

IN SINTESI

SCELTE E DECISIONI

IL MERCATO PERFETTO



Immaginiamo un mercato dove nessuno ha il potere di cambiare i prezzi. Tutti sanno tutto, le informazioni sono libere e perfette. Allora nessuno può influenzare da solo l'equilibrio del mercato.

In un mercato del genere i prezzi sono fissati solo dalla domanda e dall'offerta. È un modello ideale che aiuta a capire come funzionerebbe un sistema economico senza distorsioni.

IN SINTESI

SCELTE E DECISIONI

L'ECONOMIA DI ROBINSON CRUSOE



Immaginiamo un naufrago
da solo su un'isola.
Ha tempo e risorse limitate,
e deve decidere
come usarle.
Ogni scelta ha un costo:
pescare, costruire,
riparare, riposare.

L'isola
è un modello semplice
dell'economia.
Per prendere ogni decisione
bisogna valutare
costi e benefici.
Nascono così i concetti
di scarsità, scelta
e uso efficiente delle risorse.

5

MENTE E CONOSCENZA

Non vediamo le cose come sono, ma come siamo noi.

Anaïs Nin

La psicologia usa gli esperimenti mentali per mettere alla prova i processi della mente. Questi scenari immaginari isolano un processo cognitivo e mostrano come funziona senza “rumore” esterno, facendo emergere aspetti che nella vita quotidiana restano nascosti. L’obiettivo non è solo spiegare il comportamento, ma comprenderne la logica interna.

Il capitolo presenta cinque esperimenti mentali. La **nave di Teseo** e il **principe e il calzolaio** mostrano che l’identità personale non dipende dalla materia, ma dai ricordi e dalla coscienza. Il **cervello in una vasca** mette in discussione il legame tra percezione e realtà e chiede da dove provenga ciò che crediamo di vedere. La **stanza cinese** esplora la distanza tra seguire regole e capire davvero e rivela quanto sia incerto il confine tra pensiero e simulazione. **Mary la scienziata**, con il suo mondo in bianco e nero, indica il limite tra ciò che possiamo apprendere studiando e ciò che possiamo conoscere solo attraverso l’esperienza diretta.

5.1 LA NAVE DI TESEO

Secondo il mito, Teseo è l’eroe ateniese che sconfisse il Minotauro nel labirinto di Creta. Ora immagina la sua nave conservata in un porto. Ogni anno alcuni pezzi si rovinano e i carpentieri li sostituiscono uno alla volta con assi nuove. Passano gli anni e ogni tavola originale scompare ([figura 15](#)). A questo punto nasce la domanda: la nave che vedi è ancora la nave di Teseo oppure è una nave diversa?

Il paradosso diventa ancora più forte se qualcuno raccoglie tutte le assi vecchie e costruisce una seconda nave identica. A questo punto

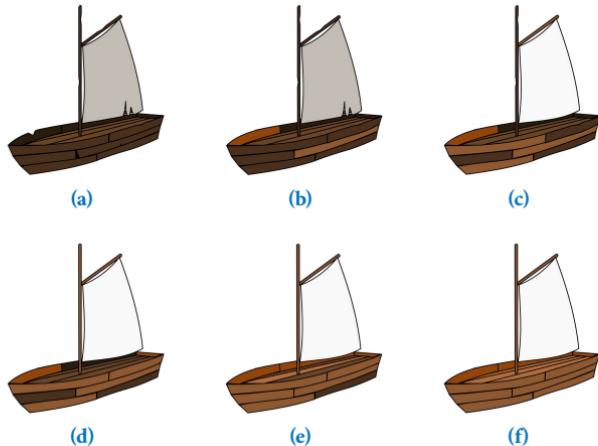


Figura 15: La nave di Teseo: via via che le sue parti vengono sostituite, è sempre la stessa nave?

la domanda cambia: qual è la vera nave di Teseo? La prima, che ha mantenuto la sua continuità nel tempo, oppure la seconda, che conserva tutti i pezzi originali?

Il paradosso della **nave di Teseo** risale all'antichità. La prima formulazione conosciuta si trova in Plutarco (I secolo). In età moderna Thomas Hobbes lo rilanciò e lo rese più incisivo introducendo la variante della seconda nave costruita con i pezzi originali.

La domanda non riguarda solo una nave: riguarda tutti noi. Il nostro corpo cambia continuamente: la pelle si rinnova in qualche settimana, il fegato in meno di un anno, perfino le ossa si ricambiano nel tempo. Dopo pochi anni, quasi nessuna cellula è la stessa. Se il corpo è ormai fatto di materia completamente nuova, si resta la stessa persona? O si diventa un individuo diverso?

Oggi la nave di Teseo è un classico della psicologia e della filosofia della mente. Mostra che l'identità non dipende dalla materia, ma dalla continuità della vita, dei ricordi e della coscienza. Ci invita a chiederci cosa resti stabile in noi mentre tutto il resto cambia.

5.2 IL PRINCIPE E IL CALZOLAIO

Immagina che la coscienza di un principe sia trasferita nel corpo di un calzolaio. La mente del principe si risveglia in un corpo che non

è il suo, con ricordi, intenzioni e desideri che appartengono alla vita del principe. Possiamo dire che quel calzolaio è, in realtà, il principe?

L'esperimento mentale, proposto da John Locke nel 1690, mostra che l'identità non dipende dal corpo. Una persona non è quello che gli altri vedono, ma quello che la sua coscienza riconosce come proprio. La conclusione richiama quella della nave di Teseo, ma da una prospettiva inversa. Nella nave di Teseo ci chiediamo se rimaniamo noi stessi mentre il corpo cambia nel tempo. Qui, invece, il corpo resta immutato e quello che cambia è la coscienza.

La continuità della coscienza è la base dell'identità personale. Anche se tutti vedono un calzolaio, quella persona è il principe, perché conserva la sua coscienza. Questa idea apre molte domande su che cosa significhi, davvero, "essere qualcuno".

5.3 IL CERVELLO IN UNA VASCA

Immagina che uno scienziato pazzo estragga il tuo cervello, lo metta in una vasca di liquido nutritivo e lo colleghi a un computer capace di fornire gli stessi impulsi elettrici che riceverebbe in un corpo normale. Il cervello continuerebbe ad avere esperienze consce, ma tutte simulate. Come potremmo sapere se viviamo nel mondo reale o in una simulazione perfetta ([figura 16](#))?



Figura 16: Un cervello in una vasca che crede di star passeggiando all'aria aperta.

L'esperimento mentale, formulato da Hilary Putnam nel 1981, mette in crisi il legame tra esperienza e realtà: la mente "sente" un mondo, ma quel mondo non esiste. Se i sensi possono essere ingannati, allora non possiamo essere certi dell'esistenza di un mondo esterno.

Il problema non ha una soluzione definitiva. L'obiettivo dell'esperimento, però, è un altro: ricordarci che quella che chiamiamo "realità" dipende dai nostri sensi, e che anche senza vasche e cavi viviamo comunque dentro i limiti della nostra mente.

5.4 LA STANZA CINESE

Immagina di essere chiuso in una stanza. Non vedi l'esterno. Davanti a te ci sono fogli pieni di simboli cinesi, ma tu non conosci quella lingua. Accanto a te c'è un manuale in italiano che ti dice esattamente che cosa fare: se ricevi un certo simbolo, devi scegliere un altro foglio con il simbolo corretto e consegnarlo fuori dalla porta. Non devi capire nulla: devi solo seguire le istruzioni.

A un certo punto qualcuno da fuori infila un foglio sotto la porta. Contiene una frase in cinese. Tu cerchi la regola nel manuale, scegli il simbolo richiesto, lo passi fuori e continui così. Da fuori, però, chi riceve i tuoi fogli crede che tu sappia davvero il cinese.

Le risposte che produci sono corrette e coerenti. Sembrano frutto di comprensione, ma tu lo sai: stai solo applicando regole. Non capisci nulla ([figura 17](#)).

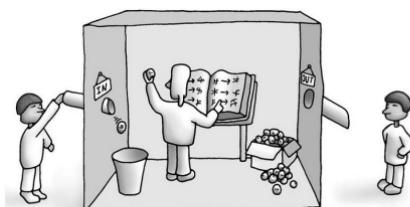


Figura 17: La stanza cinese: capire davvero o solo seguire istruzioni?

L'esperimento mentale, formulato da John Searle nel 1980, pone una domanda oggi più viva che mai: **una macchina che manipola simboli può davvero “capire”?** Secondo Searle la risposta è no: una macchina può seguire istruzioni e produrre frasi perfette, proprio come fai tu nella stanza, ma questo non significa che capisca. È la differenza tra *sembrare ed essere*.

La forza dell'esperimento sta nella sua chiarezza: niente circuiti o algoritmi, solo una stanza, dei simboli e un manuale. Ed è abbastanza per chiederti: **per capire qualcosa basta rispondere nel modo giusto, oppure serve una consapevolezza interna?** L'esperimento continua a far discutere perché sfiora il cuore della domanda sull'intelligenza: quando diciamo che qualcuno “capisce”, che cosa intendiamo davvero?

5.5 MARY LA SCIENZIATA

Immagina una scienziata di nome Mary. È una delle menti più brillanti del suo tempo. Conosce tutto sulla visione umana: sa come

funzionano gli occhi, come viaggiano i segnali nel cervello, quali processi causano la percezione dei colori.

C'è però un dettaglio: Mary ha vissuto tutta la sua vita in una stanza in bianco e nero. Le pareti sono bianche, gli oggetti sono grigi, i libri sono stampati senza colori. Anche gli schermi che usa mostrano solo una scala di grigi. Mary conosce ogni formula, ogni dato, ogni meccanismo della visione, ma non mai visto un colore.

Un giorno Mary esce dalla stanza e vede qualcosa di rosso per la prima volta. Può essere una mela, un vestito, un fiore. Conta solo la domanda al centro dell'esperimento mentale formulato da Frank Jackson nel 1982: **quando Mary vede il rosso, impara qualcosa di nuovo oppure sapeva già tutto?**

Se impara qualcosa, allora l'esperienza diretta del colore contiene informazioni che la teoria non può dare. Significa che ci sono aspetti della mente (il "che effetto fa") che sfuggono alla descrizione scientifica. Se invece non impara nulla, allora tutta l'esperienza umana potrebbe essere spiegata solo attraverso processi fisici.

L'esperimento permette di discutere il rapporto tra mente e materia e solleva una delle domande più profonde della filosofia della mente: **possiamo davvero capire l'esperienza solo studiando il cervello?**

IN SINTESI

VITA E SALUTE

LA NAVE DI TESEO



La nave di Teseo viene riparata pezzo dopo pezzo finché dell'originale non resta più nulla. È ancora la stessa nave oppure è diventata un'altra?



L'identità non sta nella materia, ma nella continuità del tempo. Il paradosso vale anche per noi: restiamo noi stessi mentre il corpo cambia?

IN SINTESI

SCOPERTE

IL PRINCIPE E IL CALZOLAIO



Se la coscienza
di un principe
fosse trasferita nel cor-
po di un calzolaio,
possiamo dire
che quel calzolaio
è in realtà il principe?

L'identità personale
non dipende dal corpo,
ma dalla coscienza.

IN SINTESI

MENTE E CONOSCENZA

IL CERVELLO IN UNA VASCA



Immaginiamo un cervello tenuto in vita in una vasca. Un computer invia impulsi identici a quelli che riceverebbe nel mondo reale. Il cervello vive un'esperienza perfetta e coerente, ma del tutto simulata.

Se tutto quello che percepiamo può essere simulato, non possiamo sapere con certezza se viviamo in un mondo reale o in una simulazione. Il paradosso mette in dubbio la nostra capacità di conoscere la realtà esterna.

IN SINTESI

MENTE E CONOSCENZA

LA STANZA CINESE



Immaginiamo
una stanza chiusa.

Dentro c'è una persona
che non conosce il cinese.
Ha però un libro di regole
che le dice come rispondere
a ogni simbolo che riceve.
Dall'esterno, le sue risposte
sembrano quelle
di un madrelingua.

La stanza produce
risposte corrette,
ma non "capisce" il cinese.
Manipolare simboli
no. è lo stesso
che capire davvero.

IN SINTESI

MENTE E CONOSCENZA

MARY LA SCIENZIATA



Mary è una scienziata che vive in una stanza in bianco e nero. Conosce tutta la teoria sui colori, ma non ne ha mai visto uno. Un giorno esce dalla stanza e vede il rosso per la prima volta.

Se Mary sapeva già tutto sui colori, imparare qualcosa di nuovo vedendo il rosso suggerisce che l'esperienza non si riduce alle sole informazioni fisiche.

A | CRONOLOGIA

La fantasia è un laboratorio infinito.

Max Planck

La **tabella 1** presenta, in ordine cronologico, gli esperimenti mentali analizzati nel libro, indicando anno di nascita, nome e autore.

Tabella 1: Cronologia degli esperimenti mentali.

Anno	Esperimento	Autore
-450	Achille e la tartaruga	Zenone di Elea
-380	L'anello dell'invisibilità	Platone
-50	La freccia oltre il confine	Lucrezio
100	La nave di Teseo	Plutarco
1604	La torre	Galileo Galilei
1607	I piani inclinati	Galileo Galilei
1632	La nave in moto uniforme	Galileo Galilei
1689	Il secchio rotante	Isaac Newton
1690	Il principe e il calzolaio	John Locke
1728	Il cannone orbitale	Isaac Newton
1814	Il demone onnisciente	Pierre-Simon Laplace
1848	L'economia di Robinson Crusoe	Frédéric Bastiat
1867	Il diavoletto	James Maxwell
1874	Il mercato ideale	Léon Walras
1905	Il treno	Albert Einstein
1907	L'ascensore	Albert Einstein
1927	Il microscopio	Werner Heisenberg
1935	Il gatto vivo e morto	Erwin Schrödinger
1935	Il paradosso EPR	Einstein-Podolsky-Rosen
1950	Il dilemma del prigioniero	Melvin Dresher

Continua nella prossima pagina

Continua dalla pagina precedente

Anno	Esperimento	Autore
1967	L'esperimento del carrello	Philippa Foot
1971	Il violinista	Judith Thomson
1971	Il velo d'ignoranza	John Rawls
1973	Il bambino sacrificato	Ursula Le Guin
1974	La macchina dell'esperienza	Robert Nozick
1980	La stanza cinese	John Searle
1981	Il cervello in una vasca	Hilary Putnam
1982	Mary la scienziata	Frank Jackson

Si conclude dalla pagina precedente

BIBLIOGRAFIA

Angelucci, Adriano

2018 *Che cos'è un esperimento mentale*, Carocci, Roma.

Balbi, Amedeo

2021 *Cercatori di meraviglia. Storie di grandi scienziati curiosi del mondo*, Rizzoli, Milano.

Bartocci, Claudio

2014 *Dimostrare l'impossibile. La scienza inventa il mondo*, Raffaello Cortina, Milano.

Bellati, Andrea

2020 *Storie di scienza e altra roba forte*, Blonk, Pavia.

Buzzoni, Marco

2004 *Esperimento ed esperimento mentale*, Franco Angeli, Milano.

Chalmers, David

1999 *La mente cosciente*, McGraw-Hill, Milano.

Cohen, Martin

2006 *Lo scarabeo di Wittgenstein e altri classici esperimenti mentali*, Carocci, Roma.

Dennett, Daniel

2017 *Coscienza. Che cos'è*, Raffaello Cortina, Milano.

Edmonds, David

2014 *Uccideresti l'uomo grasso? Il dilemma etico del male minore*, Raffaello Cortina, Milano.

Gamow, George

2010 *Il signor Tompkins*, Bollati Boringhieri, Torino.

Guardo, Andrea

2019 *Esperimenti mentali in filosofia*, Mimesis, Milano.

- Haidt, Jonathan
 2013 *Menti tribali. Perché le brave persone si dividono su politica e religione*, Codice, Torino.
- Lupacchini, Rossella
 1995 *Esperimenti mentali e realtà fisica*, Clueb, Bologna.
- Munroe, Randall
 2015 *Cosa accadrebbe se? Risposte scientifiche a domande ipotetiche assurde*, Bompiani, Milano.
- Nagel, Thomas
 2017 *Che cosa significa tutto questo?*, Il Saggiatore, Milano.
- Odifreddi, Piergiorgio
 2006 *C'era una volta un paradosso. Storie di illusioni e verità rovesciate*, Einaudi, Torino.
- Ogien, Ruwen
 2011 *Del profumo dei croissants caldi: 19 rompicapi morali*, Raffaello Cortina, Milano.
- Putnam, Hilary
 1997 *La mente e il linguaggio*, Il Saggiatore, Milano.
- Quine, Willard
 2006 *Da un punto di vista logico*, Einaudi, Torino.
- Rovelli, Carlo
 2014a *La realtà non è come ci appare. La struttura elementare delle cose*, Raffaello Cortina, Milano.
 2014b *Sette brevi lezioni di fisica*, Adelphi, Milano.
- Sandel, Michael
 2010 *Giustizia. Il nostro bene comune*, Feltrinelli, Milano.
- Sgaravatti, Daniele
 2018 *Esperimenti mentali e metodo filosofico*, Mimesis, Milano.

INDICE ANALITICO

A

Aldrin, Buzz, 11
Aristotele, 12–14, 34
Armstrong, Neil, 11
Aspect, Alain, 43

B

Bach, Johann, 36
Bastiat, Frédéric, 71, 89
Bell, John, 43
Bohr, Niels, 33, 42
Borges, Jorge, 34, 36
Boyle, Robert, 12

C

Calvino, Italo, 36
Carroll, Lewis, 36
Chaplin, Charlie, 20
Copernico, Niccolò, 14,
15

D

Diogene il Cinico, 34
Dresher, Melvin, 68, 89

E

Einstein, Albert, 7, 11,
16–21, 29,
30, 37,
40–44, 51,
89

Epicuro, 36
Escher, Maurits, 36

F

Flood, Merrill, 68
Foot, Philippa, 56, 90

G

Gagarin, Yuri, 11
Galilei, Galileo, 7, 11–17,
25–27, 89
Gödel, Kurt, 36
Gregorio di San
Vincenzo,
35

H

Hafele, Joseph, 21
Hawking, Stephen, 41,
42
Heisenberg, Werner, 8,
11, 22, 31, 89
Hitler, Adolf, 58
Hobbes, Thomas, 78
Hofstadter, Douglas, 36

J

Jackson, Frank, 81, 90
James, William, 55

K

Keating, Richard, 21
Keplero, 15
Kitano, Takeshi, 36

L

Lagrange, Joseph, 16
Landauer, Rolf, 40
Laplace, Pierre-Simon,
33, 38, 49,
89
Le Guin, Ursula, 90
Leibniz, Gottfried, 36
Locke, John, 7, 79, 89
Lucrezio, 33, 36, 37, 46,
89

M

Mach, Ernst, 7, 37
Maxwell, James, 17, 19,
33, 38–40,
48, 89
Michelson, Albert, 17, 19
Morley, Edward, 17, 19

N

Nash, John, 69, 70
Newton, Isaac, 7, 11,
15–18, 28, 33,
36–38, 47,
89
Nin, Anaïs, 77
Nobel, Alfred, 19
Nozick, Robert, 58, 90

O

Ørsted, Hans, 7

P

Pareto, Vilfredo, 69
Parmenide di Elea, 34
Pirandello, Luigi, 14
Pitagora, 8
Planck, Max, 3, 40, 89
Platone, 7, 55, 89
Plutarco, 78, 89
Podolsky, Boris, 42, 51,
89
Pound, Robert, 21
Putnam, Hilary, 79, 90

R

Rawls, John, 59, 60, 90
Rebka, Glen, 21
Rosen, Nathan, 42, 51, 89

S

- Schrödinger, Erwin, 33,
40–42, 50,
89
Scott, David, 12
Searle, John, 80, 90
Sen, Amartya, 67

Shannon, Claude, 40

- T
Thomson, Judith, 55, 56,
59, 64, 90
Tolkien, J. R. R., 56
Tolomeo, 14
Tucker, Albert, 68

W

- Walras, Léon, 70, 89

Z

- Zenone di Elea, 7, 33–36,
89