



Dean Buonomano

IL TUO CERVELLO È UNA MACCHINA DEL TEMPO

NEUROSCIENZE E FISICA DEL TEMPO

Il cervello umano non solo è in grado
di percepire il tempo: lo inventa



Bollati Boringhieri



Dean Buonomano

IL TUO CERVELLO È UNA MACCHINA DEL TEMPO

NEUROSCIENZE E FISICA DEL TEMPO

Il cervello umano non solo è in grado
di percepire il tempo: lo inventa



Bollati Boringhieri

L'autore

Dean Buonomano (1965) è docente di Neurobiologia e Psicologia all'Università della California, Los Angeles (UCLA). È uno dei principali teorici della neurobiologia del tempo e autore, oltre alla sua produzione scientifica, di *Brain Bugs. How the Brain's Flaws Shape Our Lives*, un bestseller del «Wall Street Journal». *Il tuo cervello è una macchina del tempo* è il suo primo libro tradotto in italiano.

Dean Buonomano

Il tuo cervello è una macchina del tempo

Neuroscienze e fisica del tempo

Traduzione di Enrico Griseri

Bollati Boringhieri



www.bollatiboringhieri.it



www.facebook.com/bollatiboringhieri

IL LIBRAIO

www.ilibraio.it

© 2017 Dean Buonomano

Titolo originale

*Your Brain Is a Time Machine. The
Neuroscience and Physics of Time*

© 2018 Bollati Boringhieri editore
Torino, corso Vittorio Emanuele II, 86
Gruppo editoriale Mauri Spagnol

ISBN 978-88-339-3164-7

Illustrazione di copertina:

© Idea Studio / Shutterstock

Prima edizione digitale settembre 2018

Quest'opera è protetta dalla Legge sul diritto
d'autore.

È vietata ogni duplicazione, anche parziale, non
autorizzata

Indice

Il tuo cervello è una macchina del tempo

Parte prima. Il tempo del cervello

1:00 Gusti di tempo

La scoperta del tempo

Il tempo e le neuroscienze

Presentismo ed eternalismo

Il plurale del tempo

2:00 La migliore macchina del tempo che mai vi capiterà di avere

Il cervello è una macchina del

tempo

Il tempo come maestro

I depistaggi temporali

Causa ed effetto sinaptici

Misurare il tempo su scale diverse

3:00 Giorno e notte

Esperimenti di isolamento

Il nucleo soprachiasmatico

Cellule che misurano il tempo

Il primo orologio

Il meccanismo dell'orologio

circadiano

Jet lag

In lotta con l'orologio

Il principio dell'orologio multiplo

4:00 Il sesto senso

Misurazione del tempo prospettiva e retrospettiva

La compressione e la dilatazione del tempo

Cronofarmacologia

Cause dell'effetto rallentatore

La compressione del tempo nel cervello

5:00 Schemi nel tempo

I tempi sono divertenti

Il mammese

Il codice Morse

Imparare a misurare il tempo

Tenere il tempo

Uccelli canori

La neuroanatomia del tempo

6:00 Tempo, dinamica neurale e caos

La misura del tempo sovra- e infraperiodica

Onde concentriche

Plasticità sinaptica a breve termine

Reti stato-dipendenti

Orologi di popolazione

Orologi evento-specifici

Dinamica cerebrale

Caos

Parte seconda. La natura fisica e mentale del tempo

7:00 Tenere il tempo

Sui neuroni e sulla proliferazione nucleare

Calendari

I primi orologi

Pendoli

Il quarzo e il cesio

Il tempo in vendita

8:00 Il tempo: che diavolo è?

*Il presentismo e l'eternalismo
rivisitati*

Il tempo: ne abbiamo bisogno?

Agnostici riguardo al presente

La freccia testarda del tempo

La freccia a due punte

9:00 La spazializzazione del tempo in
fisica

La relatività ristretta

La simultaneità perduta

Lo spaziotempo

È possibile conciliare la fisica e le neuroscienze del tempo?

L'universo-blocco è compatibile con le neuroscienze?

10:00 La spazializzazione del tempo nelle neuroscienze

I bambini e il tempo

Spazio, tempo e linguaggio

Mercoledì

Kappa

Orologio o memoria?

La relatività in fisica e nelle neuroscienze

11:00 Il viaggio mentale nel tempo

Rivisitare e previsitare

Il viaggio mentale nel tempo negli

animali

Vivere nel presente

Spedire messaggi nel futuro

La miopia temporale

Il viaggio mentale nel tempo e il cervello

12:00 La coscienza: un legame tra passato e futuro

Schegge di tempo

Ricalibrare il tempo

I correlati della coscienza

Il tempo e il libero arbitrio

Gli esseri umani sono prevedibili?

Delitto e castigo

Ringraziamenti

Note

1:00 Gusti di tempo

2:00 La migliore macchina del tempo
che mai vi capiterà di avere

3:00 Giorno e notte

4:00 Il sesto senso

5:00 Schemi nel tempo

6:00 Tempo, dinamica neurale e caos

7:00 Tenere il tempo

8:00 Il tempo: che diavolo è?

9:00 La spazializzazione del tempo in
fisica

10:00 La spazializzazione del tempo
nelle neuroscienze

11:00 Il viaggio mentale nel tempo

12:00 La coscienza: un legame tra
passato e futuro

[Indice dei nomi e delle opere](#)

Il tuo cervello è una macchina del tempo

Ad Ana

Parte prima

Il tempo del cervello

1:00

Gusti di tempo

Tutto ciò che veramente ci appartiene è il tempo; lo possiede anche chi non ha nient'altro.

Baltasar Gracián

Time (tempo)

Person (persona)

Year (anno)

Way (modo)

Day (giorno)

Che cosa accomuna le parole sopra elencate?

Siete certamente scusati se non avete

riconosciuto in esse i cinque sostantivi più usati della lingua inglese.¹ Che la parola *time* sia in cima all'elenco, dove compaiono inoltre due nomi di unità di tempo, è una conseguenza del ruolo preponderante che il tempo gioca nelle nostre esistenze. Nella nostra vita quotidiana, a seconda dei casi, *risparmiamo tempo, ammaziamo il tempo, teniamo il tempo, guadagniamo tempo, prendiamo tempo, diamo tempo al tempo, lavoriamo a tempo pieno, ci godiamo il tempo libero, rievochiamo i bei tempi andati, guardiamo i tempi supplementari, immaginiamo viaggi nel tempo, ammiriamo una bellezza senza tempo* o, al contrario, constatiamo i

guasti del tempo.

Per parte loro, scienziati e filosofi parlano di *tempo soggettivo*, *tempo oggettivo*, *tempo proprio*, *tempo coordinato*, *tempo siderale*, *tempo emergente*, *percezione del tempo*, *tempo di codifica*, *tempo relativistico*, *dilatazione del tempo*, *tempo di reazione*, *spaziotempo* e dell'alquanto ridondante *tempo zeitgeber* («che dà il tempo»).

Paradossalmente, benché *tempo* sia un sostantivo tanto comune, non c'è accordo sulla sua definizione. Il dilemma connaturato al tentativo di definire il tempo è stato formulato dal filosofo cristiano sant'Agostino oltre 1600 anni fa con queste celebri parole:

«Che cos'è dunque il tempo? Se nessuno m'interroga, lo so; se volessi spiegarlo a chi mi interroga, non lo so». ²

Poche questioni sono così profonde e sconcertanti come quelle che riguardano il tempo. I filosofi meditano sulla natura del tempo e si domandano se esso consista in un singolo istante o in una dimensione vera e propria. I fisici si interrogano sulle ragioni per cui il tempo pare scorrere in una sola direzione, sulla possibilità di viaggiare nel tempo e persino, tout-court, sulla sua effettiva esistenza. I neuroscienziati e gli psicologi, a loro volta, tentano di capire che cosa significhi «percepire» il passaggio del tempo, in che modo il

cervello misuri il tempo e come mai gli esseri umani possiedano la peculiare capacità di proiettarsi mentalmente nel futuro. Il tempo è inoltre al centro della questione del libero arbitrio: il futuro è un percorso aperto o è predeterminato dal passato?

Lo scopo di questo libro è quello di indagare e, per quanto possibile, rispondere a tali questioni. Nel momento in cui ci accingiamo a tale compito dobbiamo però prendere preliminarmente atto che la nostra capacità di dare risposta alle domande che riguardano il tempo è limitata dalla natura dell'organo che le pone. Benché la massa gelatinosa di cento miliardi di cellule cerebrali racchiusa nella nostra

scatola cranica sia l'apparato più sofisticato a noi noto nell'universo, essa è stata «progettata» per comprendere la natura del tempo non più di quanto il nostro computer portatile sia stato progettato per scrivere da sé il proprio software. Perciò, man mano che la nostra indagine procede, scopriremo che le nostre intuizioni e le nostre teorie intorno al tempo ci svelano informazioni sulla sua natura non meno che sull'architettura e i limiti del nostro cervello.

La scoperta del tempo

I *t e m p o* è complicato, più complicato dello *spazio*.

Sì, è vero che lo spazio ha più dimensioni del tempo: per individuare un luogo nello spazio sono necessari tre parametri (per esempio, latitudine, longitudine e altitudine), mentre per definire un istante nel tempo basta un solo numero. Dunque da un certo punto di vista è lo *spazio* a essere più complicato, ma ciò che intendo dire è che per il cervello umano è molto più difficile comprendere il *tempo* che lo *spazio*.

Pensiamo ai nostri colleghi vertebrati, con i quali condividiamo

buona parte della struttura neurale. I vertebrati sono in grado di orientarsi nello spazio, di elaborare una mappa interna del proprio ambiente e, in un certo senso, di «comprendere» il concetto di spazio. Gli animali migrano percorrendo grandi distanze e avendo ben chiara la propria destinazione; ricordano dove hanno immagazzinato il cibo; e perfino un cagnolino sa che, se un boccone è caduto dietro il divano, potrà sempre cercare di recuperarlo aggirando il divano da sinistra o da destra, scavalcandolo o passandovi sotto. Sappiamo che i cervelli dei mammiferi possiedono una mappa spaziale interna estremamente sofisticata perché da oltre quattro decenni i

neuroscienziati registrano l'attività delle cosiddette *cellule di posizione* (*place cells*) dell'ippocampo. Le cellule di posizione sono neuroni che si attivano – «si accendono» – quando un animale si trova in una specifica posizione all'interno di una stanza, ossia in un determinato punto dello spazio. Nell'insieme queste cellule formano una rete che crea una mappa spaziale del mondo esterno, un po' come fa un sistema GPS, ma in maniera molto più flessibile rispetto a quest'ultimo: ad esempio, quando i confini di una stanza vengono modificati o gli oggetti al suo interno vengono spostati, le nostre mappe interne sembrano aggiornarsi

all'istante.

Gli animali sanno non solo «navigare» lo spazio, ma anche «vederlo».³ Dalla cima di un monte vediamo il cielo sopra le nostre teste, il bosco giù in basso e un fiume serpeggiante che si getta nell'oceano, ciascuno al suo posto nello spazio. Siamo anche in grado di «udire» lo spazio, cioè di individuare il punto da cui proviene un suono. Il senso del tatto (somatosensazione) ci informa non solo sulla posizione e sulla forma degli oggetti, ma anche sulla posizione spaziale dei nostri beni più preziosi: le membra.

Il tempo è un'altra cosa. Gli animali,

ovviamente, non possono «navigare» fisicamente il tempo. Il tempo è una strada senza biforcazioni, senza incroci, senza uscite, senza rotatorie. È forse questo il motivo per cui negli animali la pressione evolutiva a mappare, rappresentare e comprendere il tempo con la stessa abilità con cui mappiamo, rappresentiamo e comprendiamo lo spazio è stata relativamente limitata. Come vedremo, sicuramente gli animali misurano il tempo e prevedono quando gli eventi avverranno, ma sembra improbabile che i nostri parenti vertebrati colgano la differenza fra passato, presente e futuro nello stesso modo in cui il loro cervello afferra la differenza fra alto, basso, destra e

sinistra. I nostri organi sensoriali non percepiscono direttamente lo scorrere del tempo.⁴ A differenza dei Tralfamadoriani del romanzo *Mattatoio n. 5* di Kurt Vonnegut, noi non siamo in grado di vedere attraverso il tempo, abbracciando con un solo sguardo passato, presente e futuro.

Il cervello di tutti gli animali, compresi gli esseri umani, è meglio attrezzato per navigare, sentire, rappresentare e capire lo spazio anziché il tempo. Una delle ipotesi che sono state avanzate per spiegare come gli esseri umani siano giunti a comprendere il concetto di tempo è che il cervello abbia cooptato a questo scopo i circuiti

già incaricati di rappresentare e capire lo spazio (cfr. [Capitolo 10](#)). Come vedremo, questa può essere una delle ragioni per cui, per parlare del tempo, sembra che tutte le culture ricorrano a metafore spaziali (è stata una *lunga* giornata, tornare *indietro* nel tempo, dobbiamo *accorciare* la lezione).

Anche per gli scienziati il tempo è più complicato dello spazio. Le scienze, come gli esseri umani, passano per diversi stadi di sviluppo, maturando e trasformandosi. E, in molte discipline, un segno del processo di maturazione è la progressiva inclusione del tempo fra i propri oggetti di studio.

La prima vera disciplina scientifica in senso moderno fu probabilmente la

geometria, formalizzata da Euclide nel III secolo a.C. La geometria è spesso definita come «il ramo della matematica che studia le proprietà e le relazioni dei punti, delle linee, delle superfici e dei solidi». ⁵ La geometria euclidea è degna di nota sia perché rappresenta una delle teorie più eleganti e rivoluzionarie dell'intera storia della scienza, sia perché ha acquisito tale reputazione nonostante il suo totale disinteresse nei confronti del tempo. La geometria avrebbe potuto essere chiamata altrettanto bene *spaziometria*: lo studio delle cose immutabili, cristallizzate nel tempo. Non è un caso se la geometria è stata una delle prime discipline

autenticamente scientifiche, perché fare scienza è molto più semplice quando ci si può permettere di ignorare il tempo.

Gli strumenti matematici a disposizione dei filosofi e degli scienziati greci erano poco adatti a studiare il modo in cui le cose mutano nel tempo. Inoltre nell'antichità era molto più facile misurare la distanza anziché il tempo, mentre oggi è vero il contrario: riusciamo a misurare il tempo molto più precisamente dello spazio (cfr. [Capitolo 7](#)). Dai tempi di Euclide trascorsero quasi duemila anni prima che prendesse avvio il processo destinato a concludersi con la piena integrazione del tempo nella matematica e nella fisica. Un passo importante in

questa direzione fu compiuto verso la fine del XVI secolo, allorché, stando a un aneddoto probabilmente apocrifo, un annoiato Galileo Galilei notò, trovandosi nel Duomo di Pisa, che il tempo impiegato da una lampada sospesa per compiere un'oscillazione completa (il suo periodo) era indipendente dall'ampiezza dell'oscillazione stessa (in seguito si sarebbe accertato che il periodo in realtà cresce leggermente al crescere dell'ampiezza).⁶ Studiando il moto, cioè il modo in cui la posizione degli oggetti cambia nel tempo, Galileo contribuì alla nascita della dinamica. Anch'egli, al pari dei Greci, non possedeva però gli

strumenti idonei a definire matematicamente le relazioni tra le forze, il moto, la velocità e l'accelerazione. Toccò a Newton e a Leibniz elaborare il metodo matematico capace di descrivere come le cose variano nel tempo: il *calcolo infinitesimale*.⁷ Servendosi di esso, Newton fu in grado di delineare le leggi che governano tanto il moto delle mele che cadono quanto dei pianeti orbitanti intorno al Sole.

Newton credeva nel tempo assoluto, un tempo che «per sua natura scorre in modo uniforme senza relazione con alcunché di esterno». Newton riteneva che esistesse un tempo vero e

universale, incondizionatamente valido per qualsiasi punto dello spazio. L'universo newtoniano si configurava come un universo deterministico, in cui tutto il tempo, passato e futuro, poteva in linea di principio essere inferito a partire dal presente. Ma la scienza doveva ancora compiere molti altri progressi, due dei quali rivestono per noi un particolare interesse. In primo luogo, gli scienziati a poco a poco raggiunsero la consapevolezza (per alcuni) scoraggiante che, anche in un universo che obbedisca interamente alle mirabili leggi di Newton, *in pratica* non è possibile predire il futuro (e retrodurre il passato). Il lavoro di molti scienziati, fra i quali il matematico francese Henri

Poincaré e il meteorologo americano Edward Lorenz, mise in luce che differenze minuscole nello stato di un sistema possono portare a esiti enormemente differenti (il più famoso esempio di ciò è l'*effetto farfalla* nel campo delle previsioni meteorologiche). Questo fenomeno va sotto il nome di *caos* e, come vedremo più avanti, si manifesta anche quando studiamo il sistema dinamico più complesso a noi noto: il nostro cervello (cfr. [Capitolo 6](#)).

In secondo luogo, Albert Einstein spazzò via l'idea newtoniana del tempo assoluto e universale. Sfidando le nostre intuizioni, Einstein dimostrò che il tempo è relativo (cfr. [Capitolo 9](#)).

Esamineremo questo argomento nel dettaglio; per il momento sarà sufficiente sottolineare che, nel corso del suo processo di maturazione, la fisica ha progressivamente fatto proprio il problema del tempo, fino ad assegnargli un ruolo fondamentale. Ma solo fino a un certo punto. Paradossalmente, infatti, esiste una corrente di pensiero che spinge per eliminare del tutto il tempo dalla fisica,⁸ il che ci riporterebbe a un universo geometrico statico che il fisico Julian Barbour ha chiamato *Platonia*, alludendo alla tesi platonica secondo cui le forme geometriche ideali sarebbero entità reali che esistono in un regno senza tempo.

Il tempo e le neuroscienze

Un processo di maturazione analogo ha caratterizzato molti altri campi dell'indagine scientifica. Per esempio, la biologia moderna – che ai suoi albori, nel XVIII secolo, si presentava come una scienza prevalentemente descrittiva e statica, interessata soprattutto a creare una tassonomia delle forme viventi – nel corso del suo sviluppo successivo ha pienamente incluso fra i propri oggetti di studio processi di natura temporale come la dinamica e l'evoluzione del vivente. Sotto questo aspetto Darwin svolse la funzione che Galileo aveva svolto nell'ambito della fisica. Comprese cioè che le specie del pianeta

Terra sono in «moto» costante: mutano, scompaiono, si evolvono.

Anche le neuroscienze e la psicologia hanno progressivamente allargato i propri interessi al problema del tempo. Benché la frenologia fosse una pseudoscienza, i frenologi ebbero perlomeno il merito di riconoscere l'importanza del nostro senso del tempo, al quale assegnarono un'area dei lobi frontali opportunamente collocata fra l'*Armonia (Tune)* e lo *Spazio (Locality)*. Secondo quanto scriveva un testo di frenologia, «la funzione di questa facoltà è quella di cogliere il passaggio del tempo, la durata, la successione degli eventi ecc. Essa inoltre ricorda le date, tiene il tempo

corretto nella musica e nella danza, e induce ad adempiere ai propri impegni con puntualità». ⁹

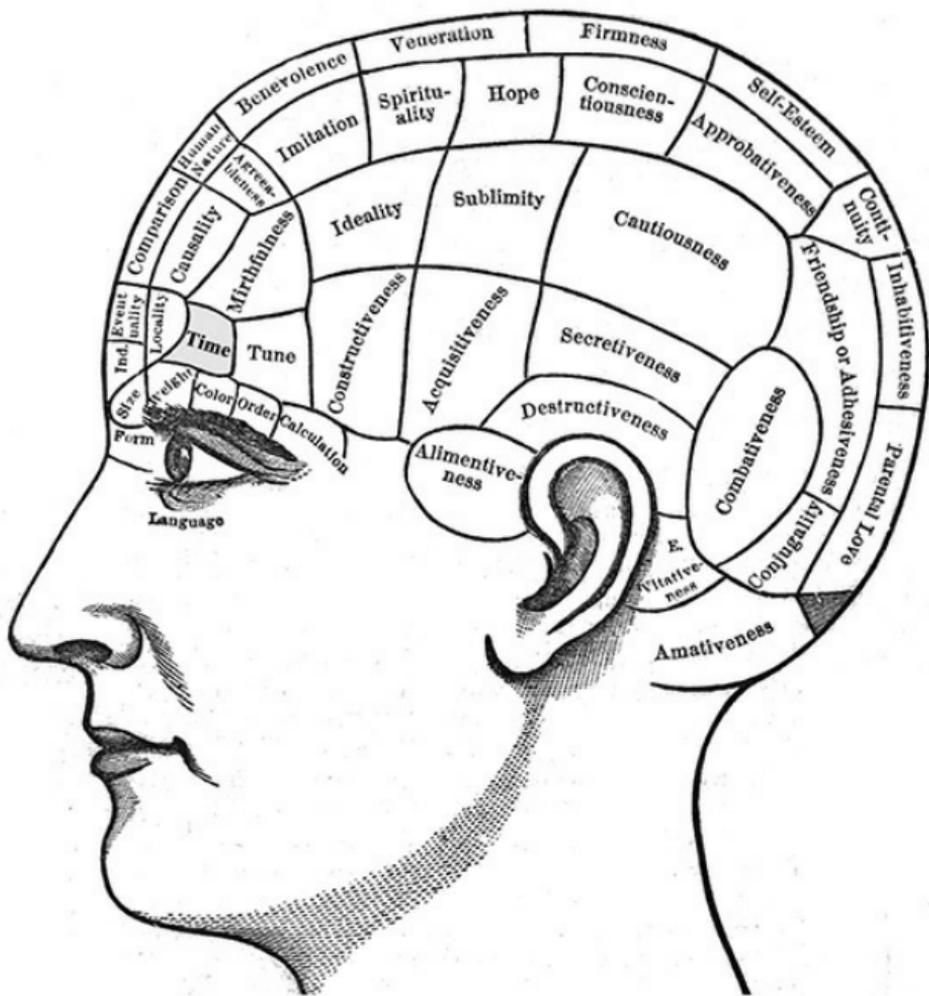


Figura 1.1

Una carta frenologica del XIX secolo.

Anche William James, uno dei padri

della psicologia moderna, era consapevole dell'importanza che il tempo riveste per lo studio della mente. Dedicò infatti un capitolo della sua opera maggiore, *I principi della psicologia* (pubblicata nel 1890), alla percezione del tempo. Curiosamente, da allora pochi libri divenuti pietre miliari della psicologia o delle neuroscienze hanno fatto altrettanto.^{[10](#)} Per buona parte del xx secolo il problema del tempo in psicologia è stato piuttosto trascurato, e ampiamente ignorato nei libri di testo.

In realtà sto un po' semplificando. In primo luogo, quello del tempo nelle neuroscienze e in psicologia non è un singolo problema, bensì un insieme di

problemi interconnessi che riguardano le modalità con le quali il cervello misura il tempo, genera schemi temporali complessi, percepisce in modo cosciente lo scorrere del tempo, ricorda il passato e pensa al futuro. In secondo luogo, in molti sottosectori della psicologia e delle neuroscienze del tempo i progressi sono stati significativi. Per esempio, la *cronobiologia*, cioè lo studio dei ritmi biologici e soprattutto dei cicli sonno-veglia, è stata per tutto il corso del xx secolo un campo di studi fiorente (cfr. [Capitolo 3](#)). Nello stesso periodo sono stati numerosi gli scienziati che, con i loro studi pionieristici, hanno fatto progredire la nostra conoscenza dei meccanismi

tramite i quali il cervello misura e percepisce il tempo. Ma, se guardiamo le cose nel loro insieme, i problemi legati al tempo sono stati generalmente trascurati. Se prendete in mano la bibbia delle neuroscienze moderne, il libro di testo *Principles of Neural Science* (tradotto in italiano con *Principi di neuroscienze*), e cercate nell'indice analitico il sostantivo più usato della lingua inglese, non lo troverete. Se invece cercate «spazio», lo troverete citato in numerose voci.[11](#)

La psicologia e le neuroscienze sono discipline scientifiche di origine recente, che soltanto ora iniziano ad avere piena consapevolezza

dell'importanza del tempo e della dinamica. Come ha scritto nel 2008 lo psicologo Richard Ivry, dell'Università della California a Berkeley, «una generazione fa le ricerche sul tempo erano limitate, e si incentravano sullo studio dei comportamenti caratterizzati da regolarità temporali. In tempi più recenti si è però assistito a una rinascita degli studi sulla percezione del tempo, con ricercatori impegnati a indagare un'ampia gamma di fenomeni temporali». [12](#)

Come esempio di tale spostamento consideriamo una delle domande fondamentali della psicologia e delle neuroscienze: *in che modo il cervello*

fissa i ricordi? Poiché i ricordi concernono le esperienze passate, la memoria è per sua natura intrecciata col tempo. Ma, perfino in questo ambito, gli scienziati hanno spesso trascurato di inquadrare correttamente il problema della memoria nel suo contesto temporale. È solo nel XXI secolo che gli studiosi hanno cominciato a comprendere pienamente che «le informazioni relative al passato sono utili solo in quanto ci permettono di prevedere che cosa potrà accadere nel futuro». [13](#) La memoria non si è sviluppata per consentirci di ricordare il passato. L'unica funzione evolutiva della memoria è quella di permettere

agli animali di prevedere che cosa accadrà e quando accadrà, e di capire come reagire nel modo migliore nel momento in cui accadrà. Grazie ai mutamenti concettuali in corso, e a una gran quantità di progressi metodologici, l'attenzione che le neuroscienze e la psicologia rivolgono espressamente al tempo è andata man mano crescendo. Ed è via via più estesa la convinzione cruciale che, se non comprenderemo il modo in cui il cervello misura, percepisce e rappresenta il tempo, non sarà possibile capire la mente umana.

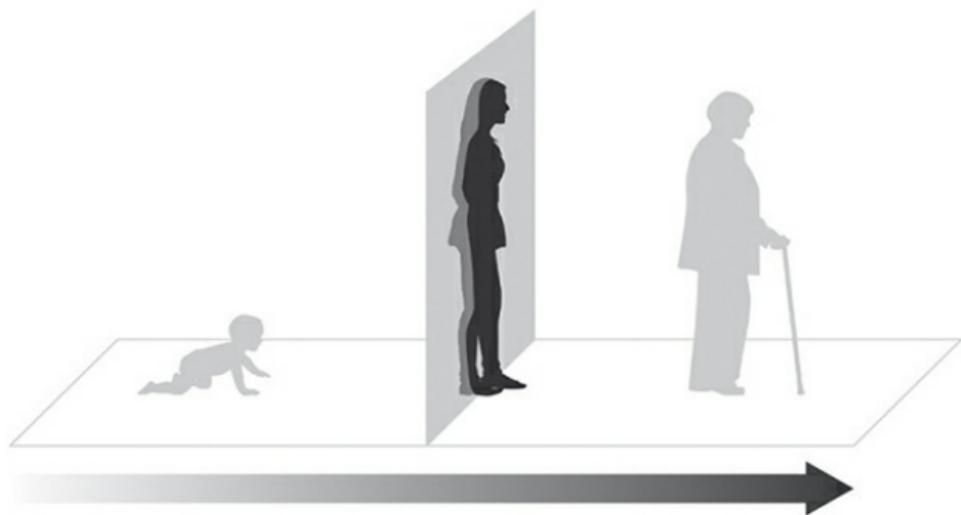
Presentismo ed eternalismo

Questo libro si concentrerà prevalentemente sulle neuroscienze e sulla psicologia del tempo, ma indagherà anche le questioni legate alla fisica del tempo. Qui l'obiettivo sarà non solo comprendere alcune delle fondamentali scoperte realizzate dalla fisica intorno alla natura del tempo, ma anche esplorare le intersezioni fra le neuroscienze e la fisica del tempo, o forse meglio sarebbe dire i loro *conflitti* (cfr. [Capitoli 8](#) e [9](#)). A questo scopo occorrerà introdurre le due maggiori teorie filosofiche relative alla natura del tempo: il *presentismo* e l'*eternalismo* (o *eternismo*).

Il presentismo, come il nome suggerisce, afferma che solo il presente è reale. Per il presentismo il passato è una configurazione dell'universo esistita un tempo, e il futuro si riferisce a una qualche configurazione ancora da determinare. In netto contrasto, l'eternalismo afferma che il passato e il futuro sono reali quanto il presente. Nel presente non vi è assolutamente nulla di speciale: per l'eternalismo l'*adesso* sta al tempo come il *qui* sta allo spazio. Anche se al momento mi trovo in un determinato punto dello spazio, so che ci sono molti altri punti – stanze, città, pianeti, galassie – in cui sarebbe ugualmente possibile trovarsi.

Parimenti, anche se mi percepisco in un punto del tempo che chiamo *adesso*, ci sono istanti passati e istanti futuri abitati da altri esseri, e da *io* più giovani e più vecchi ([Fig. 1.2](#)).

Presentismo



Eternalismo

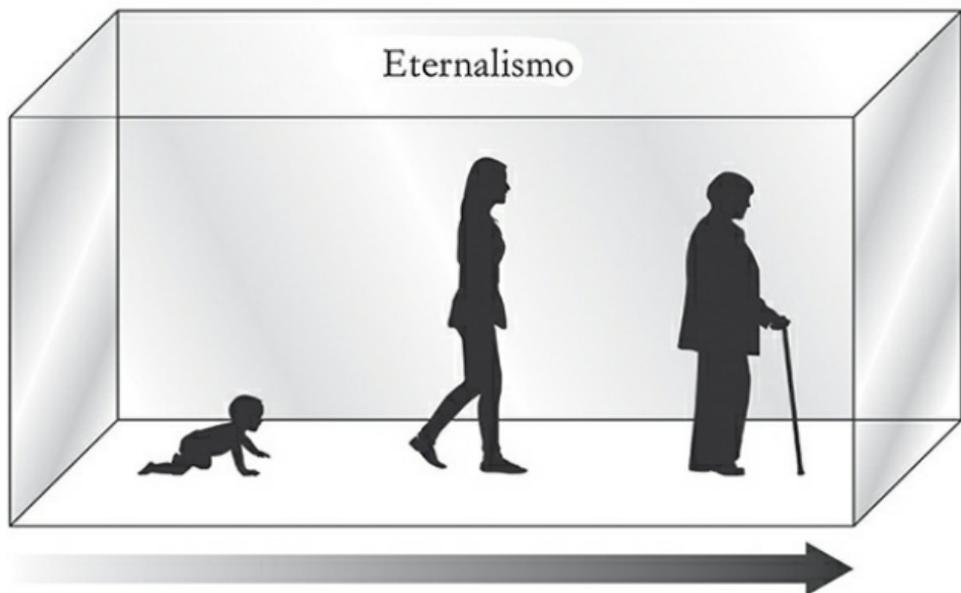


Figura 1.2

Due visioni della natura del tempo: presentismo ed eternalismo.

Forse il modo più semplice per cogliere la distinzione fra presentismo ed eternalismo consiste nel fare riferimento al concetto di viaggio nel tempo.¹⁴ Per il presentismo il viaggio nel tempo (saltare avanti e indietro tra passato e futuro) è un progetto fallito in partenza. Le considerazioni tecniche (ad esempio se sia possibile costruire una macchina del tempo, o se le leggi fisiche lo consentano) sono irrilevanti: così come è impossibile recarsi in un luogo inesistente, è infatti impossibile recarsi in un tempo che non esiste. Nella concezione eternalista il tempo è invece

una dimensione analoga (ma non identica) allo spazio; ne consegue che l'universo è un «blocco» quadridimensionale, nel quale il passato e il futuro sono non meno reali dei luoghi a nord e a sud del punto in cui ci troviamo. Benché non si pronunci sulla realizzabilità dei viaggi nel tempo, l'eternalismo legittima il dibattito sull'argomento perché prevede l'esistenza di «luoghi» (istanti) del tempo verso cui viaggiare.

Il presentismo è certamente in accordo con la nostra sensazione che, nel momento in cui si trasforma in passato, ciascun momento della nostra vita sia irrecuperabile. Che lasci o no un'impronta nella nostra memoria, di per

sé quel momento cessa comunque di esistere. Il presentismo inoltre rafforza la nostra impressione di controllo, cioè la sensazione che le nostre decisioni e azioni plasmino un futuro aperto, non predeterminato. Raramente i neuroscienziati devono operare una scelta di campo fra presentismo ed eternalismo. Ma, in pratica, sono implicitamente dei presentisti. Considerano il passato, il presente e il futuro come entità essenzialmente distinte, poiché il cervello prende le decisioni nel presente basandosi sui ricordi del passato e mirando ad accrescere il nostro benessere futuro. Sebbene corrisponda alle nostre

intuizioni, in fisica e in filosofia il presentismo non gode del favore di cui gode invece l'eternalismo.

Una delle prime versioni di eternalismo risale ad almeno duemilacinquecento anni fa, al filosofo greco Parmenide e alla sua teoria secondo cui viviamo in un mondo senza tempo, dove il mutamento non esiste. Oggi, per ottime ragioni, gran parte dei filosofi e dei fisici aderisce alla convinzione eternalista che il tempo è in qualche senso «già» tutto dispiegato nell'universo-blocco. L'idea che il tempo costituisca una quarta dimensione non è una mera astrazione matematica – che si concretizza ad esempio nella rappresentazione del tempo sull'asse

delle ascisse di un grafico –, ma colloca realmente il passato, il presente e il futuro su un identico piano.

Quanto al conflitto fra neuroscienze e fisica, se tutti gli istanti del tempo sono ugualmente reali, e tutti gli eventi del nostro passato e del nostro futuro sono perennemente integrati nell'universo-blocco, allora la nostra percezione del *flusso del tempo* non può che essere un'*illusione* ([Capitolo 9](#)). In altre parole, se tutto il tempo è già «là fuori», ne consegue che il tempo non *scorre* né *passa* nel senso normalmente attribuito a questi termini. Come ha detto il filosofo Jack Smart, «Lo scorrere del tempo o il progresso della coscienza sono metafore

pericolose, che non vanno prese alla lettera». ¹⁵ Sembrerebbe dunque che una delle esperienze soggettive più evidenti e universalmente condivise – la sensazione che il tempo scorre – debba essere declassata a una sorta di trucco della mente cosciente. Questa impostazione è ampiamente diffusa. Nel libro *Time's Arrow and Archimedes' Point* (La freccia del tempo e il punto di Archimede) il filosofo Huw Price scrive per esempio: «Su questi temi i filosofi tendono a dividersi in due campi. Da un lato ci sono quelli che considerano il fluire e il presente come tratti oggettivi del mondo [presentismo]; dall'altro, quelli che li giudicano meri artefatti

della nostra visione soggettiva del mondo [eternalismo] [...] Darò per scontata questa seconda tesi».

Il matematico e fisico Hermann Weyl ha dato una celebre formulazione del conflitto fra la nostra percezione del tempo e la visione standard dell'universo-blocco: «Il mondo oggettivo è semplicemente: non *accade*. Soltanto allo sguardo della mia coscienza, strisciando in su lungo la linea di universo del mio corpo, una sezione del mondo prende vita come immagine fugace nello spazio che muta in continuazione nel tempo». [16](#)

Il plurale del tempo

Qualunque discussione sul tempo – nelle neuroscienze come nella filosofia o nella fisica – risulta inevitabilmente complicata dal fatto che la parola *tempo* viene impiegata per indicare molte cose diverse (questo è fra l'altro uno dei motivi per cui *tempo* è il vocabolo più usato della lingua inglese). I significati di *tempo* variano da una lingua all'altra. In inglese si dice *Speed is distance divided by time* e *What time is it?*, mentre l'italiano ricorre in questi casi a due parole diverse: *La velocità è la distanza divisa per il tempo; Che ora è ?* E, a differenza della parola *time* inglese, il *tempo* italiano indica inoltre

il tempo meteorologico, che in inglese corrisponde invece a *weather*.

Nella vita quotidiana impieghiamo i diversi significati di *tempo* in maniera fluida, e ciò complica inevitabilmente i tentativi di indagare in maniera rigorosa le questioni che lo concernono. Sarà perciò utile, se non definire, almeno delimitare i diversi significati della parola. Si consideri la frase seguente: «La conferenza di Minkowski sulla natura del tempo si è conclusa nei tempi previsti ma è sembrata durare un tempo interminabile».

Questa frase creata ad hoc prova a includere tre accezioni della parola *tempo* che saranno importanti per le nostre analisi. Nell'ordine in cui

compaiono nella frase, le indicherò rispettivamente qui con le espressioni *tempo naturale*, *tempo meccanico* (*clock time*) e *tempo soggettivo*.

A livello intuitivo il tempo si presenta come il mezzo nel quale si svolgono le nostre esistenze. Uso l'espressione *tempo naturale* (come nella «natura del tempo» della nostra frase modello) per indicare questa idea del tempo come mezzo o «dimensione». Il tempo naturale è il «gusto» di tempo alla base del dibattito fra presentismo ed eternalismo. In pratica la maggior parte degli scienziati può permettersi di ignorare le questioni concernenti il tempo naturale, ma, in ultima analisi, che

cosa ci potrebbe essere di più profondamente interessante che sapere se altre «versioni» di noi stessi sono distribuite lungo la dimensione temporale dell'universo-blocco, o appurare se la nostra sensazione del fluire del tempo non è altro che una delle molte illusioni che il cervello suscita nella mente?

A fini pratici spesso il *tempo* è definito come *ciò che misurano gli orologi*. Per quanto circolare possa apparire, questa definizione è di estrema importanza. Ma conduce inevitabilmente a chiedersi: *che cos'è di preciso un orologio?* Nel senso più generale, l'orologio è un dispositivo soggetto a variazioni riproducibili che offre un

modo per quantificare tali variazioni. Le variazioni possono essere le oscillazioni di un pendolo o le vibrazioni di un cristallo di quarzo, come pure la quantità di radioisotopi di carbonio in un campione fossile. Il *tempo meccanico dell'orologio* è il significato di *tempo* maggiormente adoperato in campo scientifico. Einstein, tuttavia, ha sottolineato che «Una tale definizione è soddisfacente quando si tratti di definire un tempo soltanto per il luogo ove l'orologio si trova, ma non lo è più quando si tratti di correlare nel tempo eventi che si verificano in luoghi differenti». ¹⁷ Il *tempo meccanico* è una misura locale del cambiamento, dunque

non è né assoluto né universale. Ciononostante, il tempo meccanico è ciò che in ultima analisi regola le nostre vite: non solo ci dice quando alzarci, quando lavorare e quando dormire, ma, poiché il corpo stesso è un orologio, detta anche i tempi dell'invecchiare e del morire.

Il *tempo soggettivo* indica la nostra percezione cosciente del tempo: la sensazione soggettiva del suo trascorrere nonché della *quantità di tempo* trascorsa. Al pari di qualunque altra esperienza soggettiva, il tempo soggettivo è un costrutto del cervello: non esiste al di fuori del cranio. Così come la nostra percezione soggettiva dei colori ci consente di fare esperienza di

una proprietà fisica della luce visibile (la lunghezza d'onda), la nostra percezione soggettiva del tempo è un costrutto mentale che in certo qual modo ci permette di “sentire” sia il *tempo naturale* che il *tempo meccanico*.

I filosofi e gli scienziati meditano sui misteri del tempo da millenni. Eppure, milleseicento anni dopo che sant'Agostino lamentò le difficoltà che il tentativo di definire il tempo comporta, ignoriamo tuttora la risposta a interrogativi fondamentali: il passato, il presente e il futuro sono tutti ugualmente reali? La nostra percezione dello scorrere del tempo è un'illusione?

Prima di dare una risposta completa a

simili domande le neuroscienze dovranno ulteriormente maturare la consapevolezza che non è possibile capire la mente umana senza capire come il cervello misura, rappresenta e concettualizza il tempo. Il motivo è che, come sostengo nel prossimo capitolo, il cervello è una macchina del tempo: una macchina che non soltanto misura il tempo e prevede il futuro, ma che ci permette di proiettarci nell'avvenire. È fin troppo facile scordare il fatto che, senza la capacità di viaggiare mentalmente nel futuro, la nostra specie non avrebbe mai trasformato un'ossidiana in un utensile, né avrebbe capito che seminare oggi può garantirci la sopravvivenza nell'avvenire.

La nostra peculiare capacità di padroneggiare il concetto di tempo e di scrutare il futuro remoto è però sia un dono che una maledizione. Nel corso dell'evoluzione siamo passati dalla condizione di creature assoggettate al comportamento imprevedibile e capriccioso di Madre Natura a quella di dominatori della medesima, che manipolano il presente per assicurarsi la sopravvivenza nel futuro. Ma le nostre doti di preveggenza ci hanno anche fruttato l'inesorabile consapevolezza che il nostro tempo individuale è limitato e fuggevole. È dunque il momento di affrontare un mistero fonte di sconcerto e di meraviglia: *che cos'è*

il tempo?

2:00

La migliore macchina del tempo che mai vi capiterà di avere

Qualunque oggetto reale deve estendersi in quattro direzioni: Lunghezza, Larghezza, Profondità e – Durata. Ma, a causa della naturale debolezza della carne, di cui vi fornirò spiegazione fra un momento, tendiamo a trascurare questo fatto. Esistono realmente quattro dimensioni, tre che chiamiamo i tre piani dello Spazio, e una quarta, il Tempo.

H.G. Wells, 1895

Grazie a Hollywood abbiamo tutti una certa familiarità con il concetto di

viaggio nel tempo. *Terminator*, *Ricomincio da capo*, *Ritorno al futuro*, *Un amore all'improvviso*, *Looper* – *In fuga dal passato*, *Midnight in Paris*, *Interstellar* e una notevole quantità di episodi della serie *Star Trek* sono un piccolo campione esemplificativo di pellicole dove fanno la loro comparsa i vertiginosi paradossi che scorrazzare avanti e indietro nel tempo comporta, come tornare nel passato e commettere involontariamente un nonnicidio.

Nonostante oggi compaia ormai ovunque – dai film ai libri, dai programmi televisivi fino alla stessa fisica, dove è ormai divenuto un serio oggetto di studio –, il concetto di viaggio nel tempo spicca per la sua

assenza da gran parte della storia umana. La Bibbia, altri testi religiosi e il folklore sono pieni di storie che hanno come oggetto animali parlanti, divinità e altri esseri soprannaturali. Vi si narra di animali che si tramutano in esseri umani e viceversa, di viaggi epici che coprono distanze immense, di uomini pluricentenari come Matusalemme, di eventi magici e di resurrezioni. Ma, stranamente, mai o quasi mai di viaggi nel tempo. Persino Shakespeare, che sembrerebbe aver anticipato le trame e i colpi di scena di quasi tutti i film contemporanei, nelle sue opere non fa il minimo accenno al tema del viaggio nel tempo. Esistono parziali eccezioni:

nell'antico poema indiano *Mahābhārata*, per esempio, si narra di un re che fa visita al dio Brahma con la figlia, onde trovare a quest'ultima uno sposo degno; in seguito padre e figlia apprendono che, durante la loro visita al dio, sulla terra si sono succedute molte generazioni, e che i beni e i tesori del re sono andati perduti. Esistono dunque storie relativistiche, alla Rip Van Winkle,¹ dove il tempo scorre a velocità diverse, ma senza che ciò comporti viaggi nel passato o nel futuro. Un antesignano delle narrazioni in cui compaiono dei viaggi nel tempo è il *Canto di Natale* di Charles Dickens; in questo romanzo breve, scritto alla metà

del XIX secolo, il protagonista, Ebenezer Scrooge, viene condotto dagli spiriti a visitare i Natali passati e futuri. Il viaggio di Scrooge è tuttavia onirico e passivo: non c'è interazione fra personaggi che vivono in punti diversi del tempo. L'idea di un viaggio nel tempo vero e proprio emerse soltanto sul finire del XIX secolo; la sua espressione più celebre fu il romanzo di H. G. Wells *La macchina del tempo*, nel quale il protagonista viaggia nel futuro, interagisce con i discendenti atrofizzati della specie umana e ritorna infine nel presente.²

Per quale motivo il viaggio nel tempo propriamente detto fa il suo ingresso

nella narrativa solo alla fine del XIX secolo? Forse perché gli esseri umani sono per loro natura presentisti: poche cose sono così evidenti quanto il fatto che il passato è irrevocabilmente alle nostre spalle e dunque immutabile, e che il futuro non esiste ancora. Forse l'idea che il passato e il futuro siano reali quanto il presente, e costituiscano perciò delle potenziali mete di viaggio, era troppo fantasiosa e controintuitiva persino per la letteratura d'invenzione. Quali cambiamenti avvenuti alla fine dell'Ottocento aprirono dunque le porte della nostra immaginazione al viaggio nel tempo? È difficile dirlo, ma è certo che in quel periodo stava maturando una rivoluzione scientifica. Un evento

cruciale di questa rivoluzione fu la pubblicazione, nel 1905, della teoria della relatività ristretta di Einstein, una teoria che mandò in frantumi le nostre intuizioni sulla natura del tempo. Einstein stabilì che gli orologi ticchettano con velocità diversa a seconda della velocità con cui si muovono nello spazio. Due anni dopo, il professore di Matematica di Einstein, Hermann Minkowski, dimostrò che, da un punto di vista matematico, la teoria einsteiniana poteva essere elegantemente inquadrata in un modello di universo a quattro dimensioni, ossia un universo in cui il tempo costituisce una dimensione nel senso proprio del termine, al pari

dello spazio.

Ne l [Capitolo 9](#) analizzeremo gli argomenti che hanno portato ad accettare la teoria dell'universo-blocco $4D$; per il momento ci interessa sottolineare che, nel corso del XX secolo, il viaggio nel tempo si trasformò a poco a poco, agli occhi dei fisici, in un soggetto degno di studio. Non tanto perché la maggior parte di essi ritenesse realmente possibile viaggiare nel passato o nel futuro, quanto perché nessuno era in grado di dimostrare il contrario. In linea di principio molti fisici accettano l'idea che esistano «luoghi» del tempo verso cui dirigersi, ma ritengono che, per ragioni di natura teorica o pratica, le leggi della fisica proibiscano di

muoversi dall'uno all'altro.³ Ciò perché il viaggio nel tempo richiederebbe condizioni decisamente insolite. La modalità forse meno implausibile di viaggio nel tempo è quella che fa affidamento sui cunicoli spaziotemporali (*wormholes*). Supponete che la superficie terrestre sia un foglio di spaziotempo e immaginate di costruire un tunnel che, a mo' di scorciatoia, congiunga direttamente Washington a Pechino. Per quanto rispondenti alle attuali leggi della fisica, i cunicoli sono entità ipotetiche. E per viaggiare nel tempo bisognerebbe non solo crearne o trovarne uno, ma anche spostarne a velocità elevatissima una delle aperture.

E poi sperare che sia stabile e che lo si possa attraversare, cioè che chiunque vi entri non venga – per adottare il termine tecnico – «spaghetificato».

Ma sto divagando, perché in questo capitolo il mio intento non è discutere della plausibilità o implausibilità dei viaggi nel tempo, ma convincervi del fatto che il cervello è la migliore macchina del tempo che mai vi capiterà di avere. O, detto in altro modo, che siete la migliore macchina del tempo mai costruita.

Il cervello è una macchina del tempo

Naturalmente il cervello non ci consente di viaggiare fisicamente nel tempo, ma è una specie di macchina del tempo per quattro ragioni fra loro collegate:

. Il cervello è una macchina che ricorda il passato per prevedere il futuro

La centinaia di milioni di anni gli animali sono impegnati in una competizione per prevedere il futuro. Prevedono le azioni delle prede, dei predatori e dei partner; fanno preparativi per l'avvenire mettendo da parte scorte di cibo e costruendosi nidi o tane; precorrono l'alba e il

tramonto, la primavera e l'inverno. La capacità di prevedere il futuro è la moneta evolutiva della sopravvivenza e della riproduzione. Ecco perché, in essenza, il cervello è una macchina predittiva o anticipatoria.⁴ E, istante per istante, è automaticamente impegnato a prevedere che cosa sta per _____. Queste previsioni di breve periodo, il cui orizzonte massimo è di qualche secondo, sono del tutto automatiche e inconsapevoli. Se una pallina di caucciù cade dal tavolo, coordiniamo inconsciamente i nostri movimenti in modo da afferrarla al volo dopo che è rimbalzata per terra, ma non facciamo

la stessa cosa quando cade un bigné.

n'altra caratteristica che accomuna l'uomo ad altri animali è il tentativo costante di formulare previsioni a lungo termine. Il semplice atto di perlustrare il proprio ambiente rappresenta per un animale il tentativo di scrutare ciò che avverrà nei minuti e nelle ore seguenti: il lupo che si ferma per guardarsi intorno e per cogliere i suoni e gli odori che lo circondano è alla ricerca di indizi che lo aiutino a evitare potenziali predatori e a trovare prede e partner. Allo scopo di prevedere il futuro il nostro cervello memorizza un'enorme quantità di informazioni relative al passato; e, come il software di

backup di Apple, Time Machine, talvolta aggiunge a questi ricordi delle etichette temporali (delle date), consentendoci di ripercorrere gli episodi passati lungo una linea del tempo.

Il cervello è una macchina che misura il tempo

nostro cervello compie una grande varietà di calcoli, compresi quelli necessari a riconoscere un volto o a decidere quale mossa fare in una partita a scacchi. Misurare il tempo è un altro dei tipi di calcolo eseguiti dal cervello, un'operazione che non consiste soltanto nel misurare i secondi, le ore e i giorni, ma nel

riconoscere e generare schemi temporali come gli intricati ritmi di una canzone o la sequenza di movimenti attentamente concatenati che permettono a una ginnasta di eseguire una rondata con salto mortale all'indietro.

Misurare il tempo è una componente cruciale della previsione. Come ogni meteorologo ben sa, non è sufficiente annunciare che pioverà: occorre anche prevedere *quando* pioverà. Mentre spicca un balzo per afferrare al volo un uccellino, il gatto deve prevedere in quale punto si troverà la sua preda di lì a un secondo. Ed è noto che gli uccelli impollinatori tengono il computo del tempo che è

trascorso dalla loro ultima visita a un determinato fiore, in modo da attendere che abbia reintegrato il nettare prima di tornare a visitarlo.⁵

Gettare una lancia contro un bersaglio mobile, pronunciare con i tempi giusti una battuta, eseguire al pianoforte la *Sonata al chiaro di luna* di Beethoven, regolare i cicli sonno-veglia quotidiani e i cicli riproduttivi mensili sono tutti esempi del fatto che, in pratica, qualunque aspetto del comportamento e delle attività cognitive degli esseri umani e degli animali presuppone la capacità di misurare il tempo.

. Il cervello è una macchina che crea

il senso del tempo

differenza della vista o dell'udito, non possediamo un organo di senso deputato alla percezione del tempo. Il tempo non è una forma di energia o una proprietà fondamentale della materia rilevabile per mezzo di misurazioni fisiche. Eppure, in modo molto simile a come percepiamo coscientemente il colore degli oggetti (cioè le lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica riflessa), percepiamo in modo cosciente anche il flusso del tempo. Il cervello crea dunque la sensazione dello scorrere del tempo, una sensazione che, come la maggior parte delle esperienze soggettive, è soggetta a molte

illusioni e distorsioni. A seconda dell'influsso di un gran numero di variabili, lo stesso intervallo di tempo può darci l'impressione di passare in un baleno o di durare un'eternità. Ma, distorta o no, la sensazione cosciente che il tempo scorre e che il mondo intorno a noi è in continuo divenire è, fra tutte le nostre esperienze, una delle più familiari e inconfutabili. Esiste tuttavia un contrasto di fondo fra questa esperienza e la concezione del tempo propugnata da molti fisici e filosofi.

Il cervello ci permette di viaggiare mentalmente avanti e indietro nel

tempo

a gara per predire il futuro fu stravinta dai nostri antenati ominini nel momento in cui svilupparono la capacità di comprendere la nozione di tempo e di proiettarsi mentalmente nel passato e nel futuro, ossia di intraprendere *viaggi mentali nel tempo* (cfr. [Capitolo 11](#)). Come afferma una massima attribuita ad Abraham Lincoln, «Il modo migliore per prevedere il futuro è crearlo», e questo è esattamente ciò che il viaggio mentale nel tempo ci ha permesso di fare. Siamo passati da una condizione in cui ci limitavamo a prevedere i comportamenti capricciosi della natura a una

condizione in cui creiamo il futuro dominando la natura stessa.

Come ha spiegato l'autorevole psicologo canadese Endel Tulving: «Le prime manifestazioni del pensiero orientato al futuro e della capacità di pianificazione consistettero nell'imparare a usare, a conservare e in seguito ad accendere il fuoco, nonché a fabbricare utensili e quindi a serbarli e portarli con sé. Dotare i morti di un corredo sepolcrale, coltivare cereali, frutta e ortaggi, addomesticare gli animali per ricavarne cibo e vestiario [...] sono tutti sviluppi relativamente recenti nella storia dell'evoluzione umana.

Ognuno di essi si fonda sulla consapevolezza dell'esistenza del futuro». [6](#)

capitato a tutti di rivivere nella mente gioie o dolori del passato e di immaginare degli scenari alternativi per capire come sarebbero altrimenti potute andare le cose. Ci slanciamo invece nell'avvenire tutte le volte che nutriamo dei timori, che sogniamo a occhi aperti o che simuliamo diversi percorsi futuri nella speranza di individuare la migliore linea di azione da adottare nel presente. Gli esseri umani potrebbero anche non essere le uniche creature del pianeta a compiere viaggi mentali nel tempo,

ma sono senza dubbio gli unici animali che impiegano questa capacità per riflettere sulla possibilità di viaggiare effettivamente nel passato o nel futuro.

Il tempo come maestro

Nel XVIII secolo il filosofo scozzese David Hume rifletté intorno al modo in cui attribuiamo senso al mondo, cioè intorno al modo in cui individuiamo le relazioni fra eventi che si verificano in punti diversi dello spazio e in momenti diversi del tempo. Egli mise in evidenza tre principi basilari della conoscenza umana: la *somiglianza* (la similarità fra oggetti e fra eventi), la *contiguità* (la «prossimità» spaziale e temporale fra eventi) e la *causa ed effetto*. A proposito di quest'ultimo principio, Hume indicò alcune regole a cui facciamo ricorso per stabilire se due eventi sono in relazione causale,

comprese le due seguenti:

. La causa e l'effetto devono essere contigui nello spazio e nel tempo.

. La causa deve precedere l'effetto.⁷

Fortuna vuole che non sia necessario aver letto Hume per applicare queste regole, perché si tratta di criteri fissati nel nostro cervello a livello di sinapsi e di neuroni. Le relazioni temporali fra gli eventi sono fra gli indizi più importanti di cui si serve il cervello per attribuire un senso a ciò che William James chiamava l'«esuberante, ribollente confusione» dei dati sensoriali che tempestano i nostri organi di senso. Come fa un bambino piccolo ad apprendere che la parola *micio* indica

una creatura a quattro zampe dotata di pelo morbido e unghia affilate? Grazie al fatto che, nelle prime dieci occasioni in cui vede un gatto, i genitori gli dicono con tono suadente: «Guarda il micio miao...» In altri termini, la contiguità temporale fra la vista del gatto e il suono della parola *micio* è ciò che consente ai circuiti neurali del bambino di stabilire un collegamento fra i due stimoli.

Una delle forme di apprendimento più diffuse nel regno animale, il condizionamento classico, mette in evidenza l'importanza cruciale che la contiguità e l'ordine temporali rivestono per il funzionamento del cervello. Il cane di Pavlov rappresenta l'esempio

tipico del condizionamento classico: se suoniamo un campanello (lo stimolo condizionato) prima di offrire della carne (lo stimolo incondizionato) a un cane, quest'ultimo alla fine imparerà a salivare in risposta al semplice suono del campanello (o, per usare un esempio che forse vi è più familiare, il vostro gatto potrebbe imparare a materializzarsi in cucina al semplice rumore dell'apriscatole). Sebbene il campanello non sia la *causa* effettiva della comparsa del cibo, dal punto di vista del cane potrebbe benissimo esserlo. Il condizionamento classico è l'algoritmo primordiale che gli animali utilizzano per prevedere il futuro

immediato. I serpenti a sonagli sono esempi viventi e striscianti di un esperimento di condizionamento classico: il sonaglio rappresenta lo stimolo condizionato dal quale è desumibile che un serpente a sonagli (lo stimolo incondizionato) si trovi nei paraggi.

Lo stesso Hume non avrebbe mai potuto sospettare quanto la contiguità temporale sia importante per il funzionamento del cervello. Si prenda la sfida che riconoscere il volto della madre pone al cervello di un neonato. Il volto della madre appare al neonato ora vicino, e dunque grande, ora lontano, dunque piccolo. Le immagini che da ciascuna distanza vengono proiettate

sulla retina sono completamente diverse l'una dall'altra (ossia, come un primo piano e un ritratto da lontano dello stesso individuo attivano nella macchina fotografica configurazioni di pixel differenti, sulla retina si attivano configurazioni differenti di fotorecettori). Come fa allora un neonato a imparare che quelle immagini distinte corrispondono tutte alla mamma? Questo dell'*invarianza grandezza-distanza* è un problema complesso, e non sappiamo come il cervello lo risolva. Ma un'ipotesi è che si serva della contiguità temporale. Vedere la mamma crescere o rimpicciolirsi quando si avvicina oppure si allontana fa parte

dell'esperienza del neonato. Se il cervello presuppone che le configurazioni estremamente diverse, ma temporalmente contigue, che colpiscono la retina provengano dallo stesso oggetto, alla fine potrebbe apprendere i principi generali dell'invarianza grandezza-distanza: quelle configurazioni consecutive rappresentano uno stesso oggetto del mondo esterno.⁸ Detto in altro modo, è presumibile che, se eliminassimo la contiguità temporale (immaginate che cosa vorrebbe dire crescere in un mondo stroboscopico dove gli oggetti paiono magicamente ingrandirsi e poi nuovamente rimpicciolirsi ogni dieci

secondi), la capacità di capire che un oggetto visto a distanze differenti è sempre lo stesso oggetto risulterebbe compromessa.

Il condizionamento classico, come pure molte altre forme di apprendimento, mette in rilievo quella che è l'essenza dell'asimmetria temporale indicata dalla seconda regola di Hume (la causa deve precedere l'effetto). Quando Pavlov offrì la carne prima del suono del campanello, non si osservò alcun condizionamento. Analogamente, il condizionamento classico è molto sensibile al grado di contiguità temporale, e più precisamente al tempo che intercorre fra gli eventi. Se offriamo la carne un'ora dopo aver

suonato il campanello, il nesso fra il suono di quest'ultimo e il cibo diventa completamente invisibile agli occhi del cane, anche se il campanello preannuncia pur sempre la comparsa del cibo. La maggior parte degli animali sembra incapace di collegare i puntini temporali fra due eventi separati da minuti o da ore, e ancor più da giorni o da mesi.⁹ Più l'intervallo che separa due eventi è lungo, più è difficile rendersi conto che i due eventi sono connessi. Il condizionamento classico è una forma di apprendimento dalla vista corta.

Per comprendere le relazioni che legano eventi separati da giorni, mesi o

anni occorrono facoltà cognitive più complesse. La nostra capacità di concettualizzare e di percorrere mentalmente il tempo è ciò che ci permette di scorgere il legame che esiste fra l'atto sessuale e il parto, o fra il seme e l'albero. Ma anche noi siamo temporalmente miopi: se le sigarette provocassero il cancro una settimana anziché molti decenni dopo che si è iniziato a fumare, l'industria del tabacco non sarebbe mai diventata un business planetario da migliaia di miliardi di dollari (cfr. [Capitolo 11](#)).

I depistaggi temporali

L'importanza cognitiva della relazione temporale che lega gli eventi di cui facciamo esperienza non potrebbe essere maggiore. Per esempio, come ha osservato lo psicologo cognitivo Steven Pinker, in genere presupponiamo che l'ordine di enunciazione dei fatti rispecchi l'ordine in cui si sono svolti. Donde la battuta: *Si sono sposati e hanno avuto un bambino – ma non necessariamente in quest'ordine*. Nella maggior parte delle lingue il legame fra gli eventi è più facile da cogliere quando gli eventi stessi vengono riferiti nell'ordine in cui sono avvenuti: [10](#) *Sorrise prima di aprire il regalo* è più

facile da elaborare di *Prima di aprire il regalo sorrise.*

Le supposizioni relative all'ordine e agli intervalli temporali generate dal cervello ci consentono di capire e prevedere gli eventi, ma possono anche risultare fuorvianti. Prendiamo il seguente trucco di magia: un prestigiatore preleva una moneta dal tavolo con la mano destra, poi, con gesto ostentato, batte le mani chiuse pronunciando la formula «Abracadabra», e infine le apre mostrando che la moneta è sparita. Il trucco si basa sul depistaggio temporale.¹¹ La scomparsa della moneta è automaticamente attribuita all'evento

«più contiguo», cioè il battere delle mani e l'abracadabra pronunciato con enfasi. In realtà, ovviamente, la moneta non è mai stata nelle mani del prestigiatore: il trucco consiste nel far scivolare abilmente via dal tavolo la moneta fingendo di prenderla in mano. Ancora una volta, maggiore è l'intervallo di tempo che separa i due eventi, maggiore è la difficoltà di individuare la relazione fra gli eventi stessi. Introducendo uno scarto temporale fra la vera causa della sparizione della moneta e il momento in cui la sparizione viene rivelata, i prestigiatori sfruttano a proprio vantaggio le nostre presupposizioni temporali innate.

Nel mio libro precedente, *Brain Bugs* (I bachi del cervello), ho descritto un esempio di depistaggio temporale in cui mi sono imbattuto giocando per la prima volta a blackjack a Las Vegas. Sapevo che il blackjack si basa sulla speranza che il punteggio complessivo delle due carte che ci vengono servite sia pari a 21 e che, se la loro somma è inferiore, occorre decidere se prendere un'altra carta e correre il rischio di «sballare» (cioè di superare i 21 punti). L'avversario è il banco, il quale gioca come un automa, continuando a prendere carte finché il suo punteggio raggiunge o supera 17. Ipotizzai che, adottando la stessa strategia del banco, la mia

probabilità di vincere ogni singola mano sarebbe stata del 50 per cento. Naturalmente sapevo che la casa ha sempre un vantaggio, ma non riuscivo a capire dove stesse. In effetti il vantaggio è molto evidente: se sia io che il banco «sballiamo», vince il banco. Ma perché non riuscivo ad accorgermene? Il vantaggio della casa rimaneva invisibile ai miei occhi grazie a un depistaggio temporale. Ecco come funziona: dato che gioco prima io del banco, quando sballo il mazziere ritira immediatamente le mie carte e le mie fiches, rendendo più che palese che per me la mano è terminata. Quindi conclude il giro con gli altri giocatori e infine mostra le proprie carte. A questo punto, se sono

ancora seduto al tavolo, potrei scoprire che anche il mazziere ha sballato, e pertanto che *avremmo dovuto pareggiare*. Non mi rendevo conto del vantaggio della casa perché era nascosto nel futuro: il normale rapporto di causa ed effetto era stato temporalmente ribaltato. In un certo senso, in occasione delle mani in cui sia io che il banco sballiamo, l'effetto della mia perdita precede la causa: le mie carte e le mie fiches vengono ritirate (l'effetto) prima che io sappia se ho perso o se sono in parità con il mazziere. Era difficile capire dove sta il vantaggio della casa perché, una volta eliminato dal gioco, smettevo di indagare sulla questione.

Sfruttando questo punto cieco temporale, i casinò occultano le regole che hanno concepito a proprio beneficio.[12](#)

Causa ed effetto sinaptici

Che viviamo o meno nell'universo-blocco dell'eternalismo, dove il passaggio del tempo si rivela un'illusione, i nostri circuiti neurali risultano comunque modellati dall'ordine degli eventi e dagli intervalli che li separano. Di fatto, le regole delineate da Hume sono algoritmi che governano i circuiti cerebrali. L'asimmetria temporale fra causa ed effetto, per esempio, è incorporata nel cervello al livello più profondo.

Il nostro cervello è composto da una rete di quasi 100 miliardi di neuroni, che comunicano fra loro attraverso centinaia di migliaia di miliardi di

sinapsi.¹³ Come la maggior parte degli elementi che compongono un sistema computazionale, inclusi i transistor dei computer, i neuroni ricevono dati in ingresso (input) e generano dati in uscita (output) ([Fig. 2.1](#)). Rispetto ai transistor, tuttavia, i neuroni sono individui estroversi. All'interno di un normale microchip, un transistor è collegato su per giù ad alcune decine di altri transistor, mentre un neurone è mediamente collegato a migliaia di altri neuroni. Queste connessioni sono rese operative dalle sinapsi, che rappresentano l'interfaccia fra due neuroni: il neurone *presinaptico*, che invia il segnale, e il neurone

postsinaptico, che lo riceve. Gli input che giungono a ciascun neurone provengono dunque dai suoi partner presinaptici, ognuno dei quali emette dei «sussurri» bioelettrici. Le sinapsi eccitatorie incoraggiano il neurone postsinaptico ad «attivarsi», cioè a generare un output inviando un segnale elettrico a tutti i neuroni a valle (i suoi partner postsinaptici); viceversa, le sinapsi inibitorie cercano di convincere il neurone postsinaptico a starsene tranquillo. Essendo composto da un numero tanto elevato di neuroni, il sistema nervoso è una rete vertiginosamente complicata. Che cosa determina quali neuroni devono connettersi fra di loro?

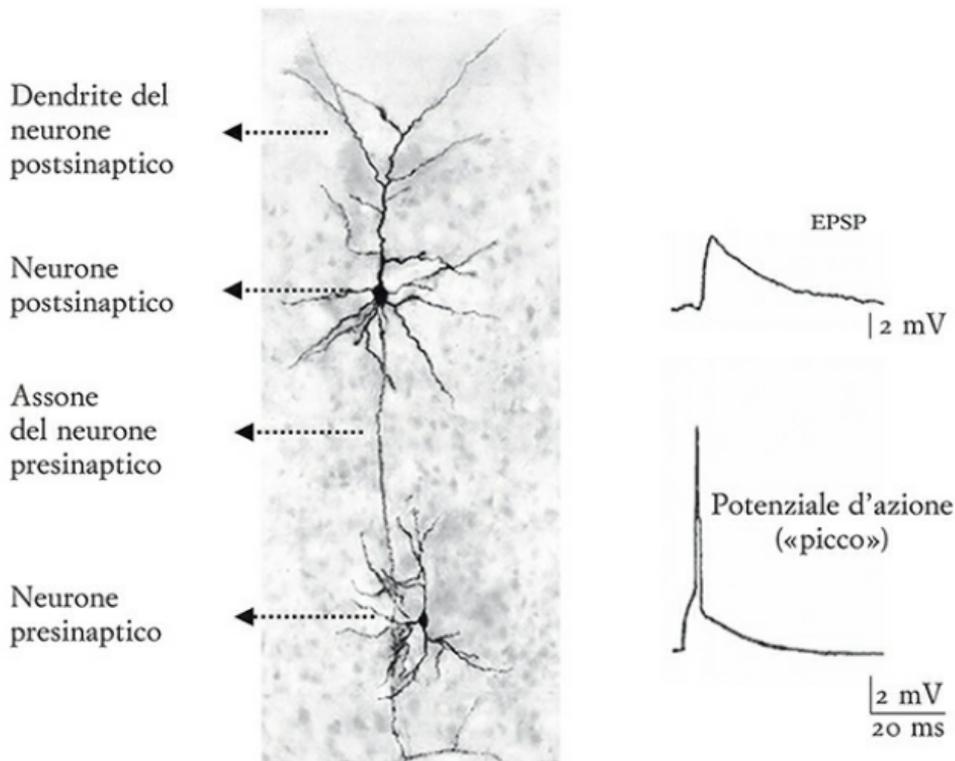


Figura 2.1

Neuroni e sinapsi. Immagine di due neuroni corticali. L'assone del neurone presinaptico si connette a un dendrite del neurone postsinaptico per mezzo di una sinapsi (non visibile). Un potenziale d'azione – ossia un rapido «picco» di tensione elettrica – nel neurone presinaptico causa un piccolo aumento della tensione elettrica del neurone postsinaptico, cioè del potenziale

eccitatorio postsinaptico (*Excitatory Postsynaptic Potential*, o EPSP) [Tratto, con modifiche autorizzate, da Feldmeyer *et al.* 2002].

Per un'analogia semplificata pensiamo a un'altra rete di elementi interconnessi, il World Wide Web. Immaginiamo che le pagine web siano neuroni e i loro link unidirezionali siano sinapsi. Le pagine a cui puntano i link sono, nella maggior parte dei casi, decise da forze esterne: i programmatori umani. Invece il cervello deve cablarsi da solo: non c'è un programmatore a dirigere le operazioni. Inoltre, nel caso del cervello si tratta di decidere non solo quali elementi connettere, ma anche quale forza assegnare a ciascuna connessione. La forza di una sinapsi

indica il grado di influenza che un neurone presinaptico esercita sul comportamento del neurone postsinaptico: la presenza di una forte sinapsi eccitatoria fra i neuroni A e B rende probabile che l'attivazione di A conduca all'attivazione di B , mentre una sinapsi molto debole significa che a B non importa un bel nulla di ciò che A gli dice di fare. Le connessioni neuronali, e la forza delle sinapsi, sono determinate in parte da algoritmi sinaptici – le cosiddette *regole di apprendimento sinaptico* – fissati nei nostri geni. Dunque i geni non codificano direttamente la forza delle sinapsi, ma determinano gli algoritmi che la

governano. 14

Esiste in particolare una regola di apprendimento – la *plasticità dipendente dalla temporizzazione dei potenziali d'azione* (*Spike-Timing-Dependent Plasticity*, o STDP) – che illustra molto bene il modo in cui l'asimmetria di causa ed effetto è incorporata nelle nostre sinapsi. Si considerino i due neuroni della [Figura 2.2](#): il neurone A è connesso al neurone B , e B a sua volta è connesso ad A . Abbiamo dunque due sinapsi: $A \rightarrow B$ e $B \rightarrow A$. Si dice in questi casi che fra i due neuroni esiste una *connessione ricorrente*: il neurone A è l'input del neurone B , e viceversa. Ora supponiamo

che ciascun neurone sia attivato da eventi distinti del mondo esterno, che i due neuroni appartengano a una lattante di nome Zoe, e che il neurone A sia attivato dal suono della lettera z e il neurone B dal suono della lettera o .¹⁵ Perciò, ogni volta che mamma e papà pronunciano il nome di Zoe, il neurone A si attiverà un attimo prima del neurone B (supponiamo che l'anticipo sia sistematicamente pari a 25 millisecondi). La funzione di una regola di apprendimento sinaptico consiste nel rafforzare o indebolire le sinapsi in base allo schema di attività dei neuroni pre- e postsinaptici. In questo caso la STDP di preferenza rafforzerà la sinapsi $A \rightarrow B$ e

indebolirà la sinapsi $B \rightarrow A$. Ci volle un tempo sorprendentemente lungo perché i neuroscienziati scoprissero questa semplice regola di apprendimento: l'esistenza della STDP fu definitivamente provata solo negli anni novanta del secolo scorso.¹⁶ Hume avrebbe approvato: la regola funziona come un rilevatore neurale di causa ed effetto. Se il neurone A si attiva prima che si attivi il neurone B , ciò significa che probabilmente ha contribuito all'attivazione di B , per cui la sinapsi $A \rightarrow B$ risulta rafforzata. Invece la sinapsi $B \rightarrow A$ spreca il proprio fiato – come chi invariabilmente ci ricordasse di chiudere a chiave la porta quando

l'abbiamo già fatto – per cui risulta indebolita (e può accadere che alla fine scompaia del tutto).

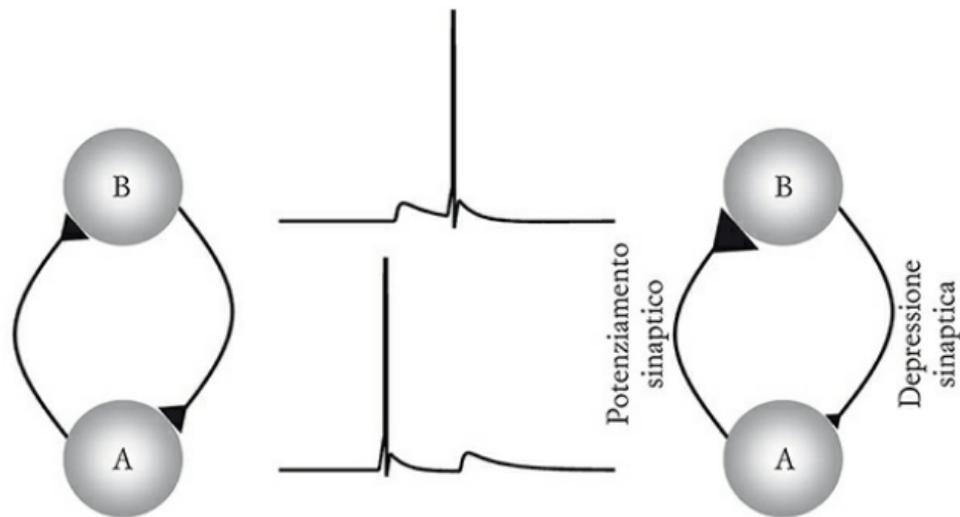


Figura 2.2

Plasticità dipendente dalla temporizzazione dei potenziali d'azione. Due neuroni reciprocamente collegati da due sinapsi (rappresentate dai triangoli di colore nero). Se il neurone inferiore si attiva sistematicamente prima di quello superiore, la sinapsi che collega il primo al secondo si rafforza (potenziamento sinaptico), mentre quella che

collega il secondo al primo si indebolisce
(depressione sinaptica).

Si ritiene che la capacità delle sinapsi di apprendere nessi di causa-effetto fra i neuroni spieghi in parte la capacità cerebrale di apprendere le relazioni che legano fra loro gli eventi del mondo esterno. Nel nostro esempio, la regola di apprendimento $STDP$ potrebbe aiutare i neuroni a reagire alla sequenza *z-o-e* ma non alla sequenza, raramente pronunciata, *e-o-z*, aiutando in questo modo Zoe a riconoscere il proprio nome. Ma la $STDP$ è solo una delle molte regole di apprendimento a disposizione del cervello. La $STDP$ opera in prossimità del massimo livello di risoluzione

raggiungibile dal sistema nervoso: basta infatti una differenza di qualche millisecondo nella comparsa di un picco postsinaptico per determinare se la sinapsi si potenzia o si indebolisce. La STDP non è invece in grado di cogliere il nesso che intercorre fra eventi separati da intervalli superiori al secondo. Per riuscirci occorrono infatti meccanismi più complessi, che non si basano su due neuroni isolati bensì su numerose popolazioni di neuroni. In un modo o nell'altro, i neuroni e le sinapsi del nostro cervello riescono comunque a cogliere le relazioni che legano eventi separati da intervalli, brevi o lunghi che siano, permettendoci di attribuire un senso ai fatti che si svolgono intorno a

noi.

Misurare il tempo su scale diverse

Chiudete gli occhi e concentratevi su un rumore dell'ambiente in cui vi trovate, ad esempio sul ronzio di un elettrodomestico. Non avrete difficoltà a capire se il ronzio proviene dalla vostra destra oppure dalla vostra sinistra. Ma come riesce il cervello a capirlo? Un suono proveniente da sinistra raggiunge il nostro orecchio destro in un tempo leggermente superiore a quello che impiega per raggiungere il nostro orecchio sinistro. Questi cosiddetti ritardi interaurali dipendono dalla velocità del suono e dalle dimensioni della nostra testa. I minimi ritardi percepibili dagli esseri umani si

aggirano sui 10 microsecondi, un intervallo mille volte più breve della risoluzione dei cronometri impiegati per misurare il tempo nella gara dei cento metri piani alle Olimpiadi. Per localizzare la sorgente sonora le aree del cervello preposte all'elaborazione del suono devono misurare ritardi di questa entità. L'evoluzione ha sfruttato il fatto che, essendo la velocità del suono relativamente costante, lo spazio e il tempo risultano complementari, sicché misurare il tempo ci permette di «misurare» lo spazio.

Ma è su una scala temporale leggermente superiore – dalle decine di millisecondi a un secondo circa – che la nostra capacità di misurare il tempo

raggiunge i risultati più impressionanti. In questo intervallo riusciamo non soltanto a stimare il tempo che separa due eventi, ma anche ad analizzare e interpretare i complessi schemi temporali caratteristici della musica e del linguaggio. Per esempio, la durata delle sillabe o delle pause nel parlato contribuisce a demarcare i confini di parola, come nel caso di *grade A* (il voto massimo nel sistema scolastico anglosassone) e *gray day* («giornata grigia»). La durata delle parole e la velocità del discorso contribuiscono inoltre a caratterizzare la *prosodia*, la quale trasmette lo stato emotivo del parlante: si pensi al modo di parlare

fiacco di una persona clinicamente depressa o, al contrario, a quello vivace ed energico di un'adolescente piena di entusiasmo. Lo stesso vale per la musica. Come i termini *grave* e *allegro* lasciano intendere, i tempi musicali lenti o veloci possono essere impiegati per comunicare, rispettivamente, sentimenti di tristezza o di felicità. Come nella relazione fra i puntini di colore di un dipinto di Seurat riusciamo a cogliere un volto, sulla base dei rapporti temporali che intercorrono fra le parti di un discorso o di un brano musicale siamo in grado di cogliere l'insieme. Ma riusciamo a cogliere questi schemi temporali solo su una scala di tempo molto limitata, dell'ordine di un secondo

circa. Se rallenta oltre una certa soglia, il parlato diventa inintelligibile e, se accelera oltre una certa soglia, la musica cessa di essere tale (cfr. [Capitolo 5](#)).

La misurazione del tempo e la percezione cosciente del flusso del tempo sono due processi distinti. La coscienza è troppo lenta per riuscire a fornire in diretta un resoconto delle pause fra le parole, o per calcolare il momento in cui allungare la mano per afferrare la palla. Ma sulla scala dei secondi e oltre, non solo siamo consapevoli dello scorrere del tempo, ma abbiamo anche un'idea di massima dell'intervallo che separa gli eventi. Siamo in grado di prevedere a livello

cosciente quando il semaforo diventerà verde, intuiamo che un blocco di spot televisivi sta per finire e che la partita sta per ricominciare, e contiamo metaforicamente i secondi mentre aspettiamo con impazienza che il signore in coda davanti a noi decida se vuole anche il contorno di patatine.

Il cervello è un prodotto della selezione naturale, per cui è stato «progettato» per sopravvivere in un mondo inclemente e in continuo cambiamento. L'esperienza dimostra che uno dei metodi migliori per prosperare in un mondo siffatto consiste nel prevedere *che cosa* avverrà nel futuro, e *quando* avverrà. Di conseguenza, il

cervello è sia una macchina anticipatoria, sia una macchina che misura il tempo. Quantifica il passaggio del tempo su un arco di oltre dodici ordini di grandezza, dal minuscolo intervallo che il suono impiega a percorrere la distanza fra le due orecchie fino all'alternarsi delle stagioni.

Siamo circondati da orologi: al polso, sul muro, nello smartphone, nel computer, nell'auto, negli elettrodomestici. Ma anche dentro di noi gli orologi abbondano. Il cervello e il corpo degli esseri umani e degli altri animali misurano il tempo: persino una singola cellula epatica è in grado di dire in quale momento del giorno ci

troviamo. Ma come fa il cervello a misurare il tempo? E quale parte del cervello svolge questo compito? Oggi sappiamo che non esiste un'unica risposta a queste domande. L'evoluzione ha dotato il cervello di una gran quantità di meccanismi per misurare il tempo. Questa strategia, fondata sull'impiego di orologi diversi a seconda della scala temporale coinvolta (ciò che chiamerò *principio dell'orologio multiplo*), contrasta con quella su cui si basano gli orologi fabbricati dall'uomo. Anche il più semplice degli orologi da polso è infatti in grado di misurare con precisione i centesimi di secondo, i secondi, i minuti, le ore e i mesi. Nel

cervello, invece, i circuiti neurali preposti a tenere il tempo durante l'esecuzione della *Quinta* di Beethoven non hanno la lancetta delle ore, e i circuiti che regolano il nostro ciclo sonno-veglia sono privi di quella dei secondi. Se ciò a prima vista può apparire controintuitivo, vedremo che – data l'importanza fondamentale che il tempo riveste per ogni aspetto del comportamento e dell'attività cognitiva, e dato lo specifico insieme di problemi temporali che il cervello deve risolvere – è esattamente quello che ci dovremmo aspettare.

3:00

Giorno e notte

Forse tanto vale rassegnarsi al fatto che il tempo è una delle cose che probabilmente non sappiamo definire... In ogni caso ciò che davvero conta non è il modo in cui definiamo il tempo, ma il modo in cui lo misuriamo.

Richard Feynman

Uno dei misteri più futili di tutta la scienza è: *perché i topi adorano le ruote?* Chiunque abbia avuto un topo o un ratto domestici, o li abbia osservati in un negozio di animali, avrà probabilmente notato la loro

inesauribile passione per le corse nella ruota. Qual è la causa di tanta passione? La ragione non sembra essere che i poveretti non hanno nulla di meglio da fare. Si raccontano storie di topi selvatici trovati a girare su ruote abbandonate in un garage, e di ratti di laboratorio che, dopo essere riusciti a fuggire dalla gabbia, sono stati ricatturati perché avevano deciso di farsi ancora un giro sulla ruota. Questi aneddoti sono corroborati da una ricerca nella quale i biologi, dopo aver collocato ruote e macchine fotografiche nascoste in habitat naturali, poterono constatare come i topi selvatici si divertissero a correre sulle ruote e a

saltarvi ripetutamente su e giù.¹ Come adolescenti che spendono in un centro commerciale i loro sudati guadagni, i roditori sono persino disposti a «lavorare» per correre: se alle loro ruote viene applicato un freno, i ratti premono la leva che lo sblocca in modo da potersi fare un giro.² Il rapporto fra roditori e ruote ha anche dei lati negativi. Quando i ratti sono sottoposti a una dieta ristretta le ruote possono danneggiare la loro salute: i ratti il cui accesso al cibo è razionato aumentano infatti la loro attività sulle ruote e, rispetto ai ratti che ricevono la stessa quantità di cibo ma non hanno ruote a disposizione, presentano un numero

maggiore di problemi di salute e un tasso di mortalità più elevato.³

Risolveremo mai questo minuscolo mistero? Quale che sia la risposta, il fatto che topi, ratti e criceti amino compulsivamente girare sulla ruota ci ha permesso di far molto progredire la comprensione del modo in cui il cervello misura il tempo, o almeno il tempo della giornata. Il grafico della [Figura 3.1](#) è detto «attogramma». Raffigura il tempo trascorso da un topo sulla ruota ed è generato tracciando un segno verticale ogni volta che la ruota, spinta dal topo, compie un giro completo. Per offrire una visualizzazione migliore e per evitare

discontinuità grafiche durante ciascun periodo di 24 ore, il diagramma è duplicato (*double-plotted*), cioè l'attività dei giorni consecutivi è riportata sia alla destra che al di sotto del giorno precedente. La barra in bianco e nero all'estremità superiore del grafico rappresenta il ciclo di 24 ore luce/buio nella stanza. Topi e ratti sono creature notturne per cui preferiscono correre sulla ruota di notte, ma può accadere che in laboratorio la loro «notte» coincida con il nostro «giorno», dato che spesso i cronobiologi invertono il ciclo luce/buio delle stanze dove si trovano i topi in modo da non obbligare gli studenti laureati a stare svegli tutta la notte per studiarli. Il diagramma mostra

che quando le luci vanno via il topo balza sulla ruota e inizia a correre, continuando a saltare su e giù dalla ruota per tutta la notte. Dopo alcuni giorni i ricercatori crearono una condizione di oscurità permanente. Si può notare che, anche in assenza totale di segnali esterni che indichino se è «giorno» oppure «notte», il topo continua a seguire un ritmo ben definito, oscillando fra attività e requie. Ma in condizioni di costante oscurità comincia ad accadere qualcosa di interessante: il periodo del ciclo man mano si accorcia per poi assestarsi su un valore differente, come è indicato dallo slittamento progressivo verso sinistra. Il ritmo sonno-veglia, almeno nei topi, non

è precisamente calibrato su un ciclo di 24 ore.

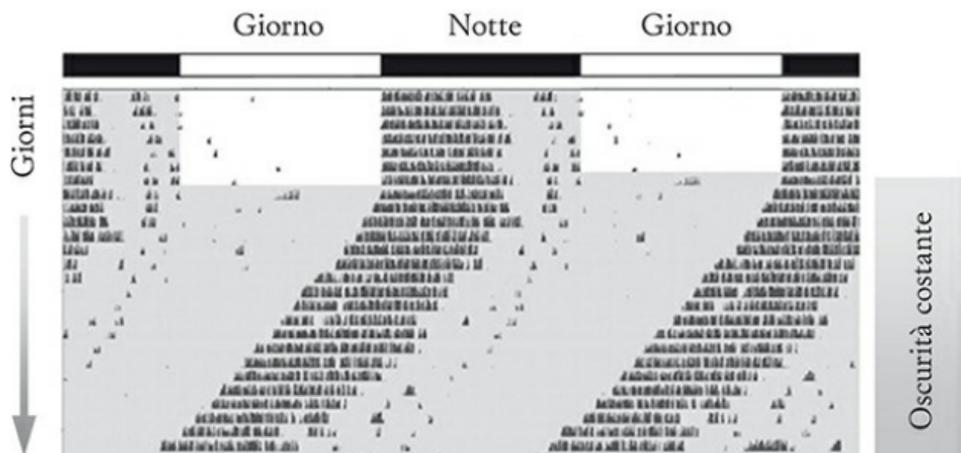


Figura 3.1

Ruote per roditori e attogrammi. L'attività notturna di un topo è indicata dai segni di spunta neri, che rappresentano i giri di una ruota per roditori. Se i topi sono tenuti costantemente al buio il loro ritmo circadiano si attesta su un periodo di circa 23,5 ore, che produce un progressivo slittamento a sinistra del tracciato. Gli attogrammi sono tracciati due volte, il che significa che uno stesso periodo di 24 ore è rappresentato al termine di una riga e all'inizio della riga sottostante.

[Tratto, con modifiche, da Yang *et al.* 2012, con licenza CC BY]

Per millenni si è pensato che le fluttuazioni quotidiane del sonno e della fase di attività degli esseri umani e di altri animali fossero governate da stimoli esterni, primi fra tutti il sorgere e il calare del sole. Ma esperimenti simili a quelli riportati nella [Figura 3.1](#) hanno provato che, anche in assenza di segnali esterni, il sonno, l'attività, la nutrizione e la temperatura corporea degli animali continuano a manifestare oscillazioni giornaliere. Questi cicli dimostrano che deve esserci un orologio interno – un *orologio circadiano* – che presiede ai ritmi quotidiani della nostra vita.

Quanto è efficiente il ritmo circadiano, e come si comporta rispetto agli orologi fabbricati dall'uomo? La prestazione degli orologi, tanto biologici quanto artificiali, è misurabile secondo due parametri: la precisione e l'accuratezza. La precisione si riferisce alla deviazione media calcolata su un gran numero di cicli dell'oscillatore, mentre l'accuratezza si riferisce alla differenza fra il periodo medio e il periodo di riferimento o atteso. Se l'oscillazione completa di un pendolo dovesse durare 1 secondo ma il suo periodo medio fosse in realtà di 0,8 secondi, il pendolo non sarebbe molto accurato (il suo errore sarebbe del 20

per cento). Ma se nel corso di decine di migliaia di oscillazioni il periodo minimo e quello massimo rimanessero compresi fra 0,79999 e 0,80001 secondi, il nostro pendolo sarebbe d'altra parte molto preciso. Come si può desumere dalla [Figura 3.1](#) il periodo dell'orologio circadiano non è esattamente di 24 ore; il suo ciclo naturale è più vicino a 23,5 ore.⁴ Perciò, in rapporto al tempo che il nostro pianeta impiega per compiere una rotazione completa, l'orologio circadiano risulta ragionevolmente accurato (l'errore è del 2 per cento). In genere gli orologi circadiani degli animali notturni hanno un periodo

leggermente inferiore a 24 ore, mentre quelli delle creature diurne, esseri umani compresi, tendono ad avere periodi intrinseci leggermente superiori a 24 ore. La precisione dell'orologio circadiano è più spiccata. Possiamo constatarlo osservando che, nella [Figura 3.1](#), l'anticipo della fase di attività è più o meno lo stesso per ciascun giorno (rappresentato da una diversa riga). Le ricerche dimostrano che nel corso dei giorni passati in condizioni di oscurità costante la deviazione standard del momento in cui il topo inizia a correre può essere compresa fra 10 e 20 minuti appena, una «precisione» dell'1 per cento circa in rapporto al periodo

di 23,5 ore dell'orologio.⁵

È questa notevole precisione dell'orologio circadiano che presumibilmente favorisce la capacità di alcuni individui di svegliarsi su per giù all'ora desiderata. William James cita questa capacità di risveglio spontaneo nella sua opera maggiore, *Principi di psicologia*: «Da sempre sono colpito dalla precisione con cui mi risveglio spaccando il minuto, notte dopo notte e mattina dopo mattina». In condizioni di laboratorio, tuttavia, la capacità di svegliarsi da soli è raramente precisa come si suppone che sia: di fatto è probabile che essa dipenda in parte dalla capacità del cervello dormiente di

cogliere alcuni segnali esterni.⁶ In ogni caso, come vedremo nel [Capitolo 7](#), una precisione dell'1 per cento supera quella di tutti gli orologi costruiti fino al XVII secolo, allorché Christiaan Huygens ideò i primi orologi a pendolo ad alta precisione.

Esperimenti di isolamento

I ritmi circadiani osservati in assenza di segnali esterni sono detti ritmi free-running (ossia ad andamento libero). Per studiare i ritmi circadiani free-running negli esseri umani occorre trovare persone disposte a vivere totalmente isolate dal mondo esterno per molti giorni consecutivi o addirittura per mesi. In uno dei più famosi esperimenti di questo tipo, svoltosi nel 1972, il geologo francese Michel Siffre trascorse sei mesi in una grotta del Texas. L'esperimento fu finanziato dalla NASA, che era interessata a capire gli effetti fisici e mentali dell'isolamento cronico in vista di possibili missioni

interplanetarie. A Siffre, sistematosi nelle profondità della grotta, furono forniti cibo e acqua in quantità, un semplice campo base e apparecchiature che registravano i suoi schemi di sonno. Non c'erano cambiamenti di luce prodotti dall'esterno o fluttuazioni significative della temperatura che potessero servirgli come riferimenti temporali. Era «free-running» ma, a differenza dei topi di laboratorio free-running, non era costantemente al buio; poteva infatti telefonare in qualsiasi momento all'unità di superficie per far accendere o spegnere una batteria di luci situata all'interno della caverna.

Nel caso dei topi gli esperimenti di isolamento non sembrano produrre

livelli anormalmente elevati di stress fisiologico o una sofferenza psicologica significativa. Non è difficile immaginare un topo selvatico che vive in una grotta o in una cantina, isolato da qualunque fonte luminosa per giorni e giorni. Inoltre, per i roditori la vista non è così importante come per gli esseri umani: in quanto animali notturni, per orientarsi nel mondo i topi e i ratti ricorrono in ampia misura all'udito e a una dotazione di baffi altamente complessa. Per gli esseri umani gli esperimenti di isolamento si rivelano molto più gravosi. Siffre soffrì di accessi di depressione, di cali mentali, di amnesie e di pensieri suicidari, e il suo orologio

circadiano andò completamente fuori fase. Nei primi giorni il suo ciclo circadiano si allungò a 25 o 26 ore, ma successivamente manifestò ampie fluttuazioni, raggiungendo talvolta una durata di 48 ore, nel corso delle quali Siffre dormiva per 16 ore e stava sveglio per oltre 32 ore.

Il centosettantanovesimo giorno fu comunicato a Siffre che l'esperimento era giunto al termine. La notizia lo colse di sorpresa perché, secondo i suoi calcoli, viveva nella grotta da 151 giorni, una sottostima del 16 per cento. In sostanza il tempo per lui si era dilatato: rispetto al tempo oggettivo il suo personale senso del tempo aveva subito un rallentamento. Data la

prostrante monotonia della condizione di isolamento, è controintuitivo pensare che Siffre avesse sottostimato la quantità di tempo trascorsa. Eppure questo tipo di dilatazione temporale è stato osservato in numerosi esperimenti di isolamento umano. Nel 1988 Véronique Le Guen trascorse 111 giorni in isolamento in una grotta francese, e al momento della sua uscita era convinta che ne fossero passati 42! Nel 1989 una decoratrice d'interni italiana, Stefania Follini, visse quattro mesi in una grotta 15 metri sotto la superficie terrestre. Poco prima dello scadere dei quattro mesi pensava che ne fossero trascorsi due. Nel 1993 un sociologo italiano,

Maurizio Montalbini, trascorse un anno in isolamento in una grotta; quando ne uscì, il 5 dicembre, credeva che fosse il 6 giugno.⁷

Un limite di questi esperimenti deriva dalla possibilità che i soggetti non siano di fatto così isolati dai segnali circadiani come potrebbe sembrare. Le grotte hanno un bioma che comprende pipistrelli e insetti, i quali potrebbero offrire a chi vive nella grotta, che ne sia consapevole oppure no, indizi circa lo scorrere del tempo esterno. Siffre, ad esempio, rievoca i suoi infruttuosi tentativi di stringere amicizia con un topo di caverna, ed è presumibile che il topo avesse maggiori probabilità di

comparire la notte. Per sopperire a questi limiti, e per evitare che sia i soggetti dell'esperimento sia gli scienziati vivano per lunghi periodi di tempo in zone remote, i cronobiologi hanno svolto esperimenti di isolamento anche in laboratori specializzati o in bunker. Uno studio pubblicato nel 1985 esaminò 42 volontari che avevano trascorso in isolamento periodi di durata compresa fra una settimana e un mese. I soggetti erano vissuti da soli in un bunker senza ricevere dall'esterno informazioni circa il tempo reale. Si preparavano da mangiare e potevano accendere e spegnere le luci a piacimento. Dovevano registrare i loro tempi di sonno e di veglia, e la loro

temperatura corporea era costantemente monitorata. Anche in questi casi la maggioranza dei partecipanti risultò credere che la durata dell'esperimento fosse stata del 20-40 per cento inferiore a quella effettiva.⁸ E, come negli esperimenti in grotta (e a differenza di quelli sui roditori), il periodo circadiano dei soggetti, anziché stabilizzarsi su cicli precisi e riproducibili, presentava spesso un andamento ondivago.

Studiare i cicli sonno-veglia non è l'unico modo per analizzare il funzionamento del ciclo circadiano. Molte misure fisiologiche oscillano in base al momento della giornata. La

temperatura corporea dell'uomo, per esempio, non è costantemente pari a 37 °C. Durante il giorno fluttua intorno a questo valore medio, raggiungendo in genere il picco nelle prime ore serali. In molti dei partecipanti agli esperimenti il ritmo della temperatura rimaneva prossimo alle 24 ore, anche quando il ciclo sonno-veglia risultava invece di 20 o di 40 ore: un indizio importante a favore della tesi dell'esistenza di più orologi circadiani in noi e della possibilità che tali orologi non sempre coincidano.

Il nucleo soprachiasmatico

Al fondo del nostro cervello si trova una struttura detta ipotalamo. E al fondo dell'ipotalamo, al di sopra del *chiasmo ottico*, cioè l'incrocio dei nervi che portano le informazioni provenienti dall'occhio destro e da quello sinistro, vi è un'area appropriatamente denominata *nucleo soprachiasmatico*.

Fin dagli anni settanta sappiamo che i roditori il cui nucleo soprachiasmatico è lesionato presentano schemi di sonno che non hanno nulla di circadiano. Dormono infatti per brevi periodi disseminati lungo tutto l'arco del giorno e della notte. Queste prime osservazioni condussero a formulare l'ipotesi che il

nucleo soprachiasmatico fosse l'orologio circadiano fondamentale. La conferma giunse negli anni ottanta grazie a una serie di esperimenti convergenti. Uno dei più cogenti fu, in sostanza, un esperimento di trapianto cerebrale.⁹ I criceti free-running hanno un periodo sonno-veglia la cui durata è molto vicina alle 24 ore. Esiste nondimeno una mutazione che dà origine a criceti il cui «giorno» free-running è molto più breve, cioè 20 ore. Se il nucleo soprachiasmatico è l'orologio circadiano fondamentale, allora – ragionarono i ricercatori – dovrebbe essere possibile trasformare un criceto il cui giorno è di 20 ore in un criceto il

cui giorno è di 24 ore trapiantando il nucleo soprachiasmatico dall'uno all'altro. In linea generale simili trapianti di aree cerebrali sono materia buona per la fantascienza. Ma la relativa semplicità del nucleo soprachiasmatico lo rende una delle poche parti del cervello che è possibile trapiantare con successo. A differenza di molte altre aree cerebrali esso è infatti una struttura piuttosto compartimentata, che riceve input da poche altre zone del cervello. E, ciò che più conta, comunica con il resto del cervello non solo per mezzo di impulsi elettrici mediati dagli assoni, elementi delicati che non si rigenerano in maniera ottimale, ma anche mediante ormoni che rilascia direttamente nel

flusso sanguigno. Quando i ricercatori lesionarono il nucleo soprachiasmatico di un ricevente e vi trapiantarono le cellule prese dal criceto di un altro ceppo, trasformarono i criceti dal giorno breve in criceti dal giorno lungo e viceversa, dimostrando così che il ritmo circadiano non è governato dal corpo o dal cervello del ricevente: sono i neuroni del nucleo soprachiasmatico (un umile agglomerato di circa 10 000 neuroni) che assumono il controllo e dicono al cervello del ricevente quando andare a dormire e quando alzarsi e cominciare a correre sulla ruota.

Cellule che misurano il tempo

Avere un cervello è un prerequisito per possedere un ritmo circadiano? Individuare e anticipare le fluttuazioni di luce e temperatura imposte dalla rotazione terrestre è così importante che praticamente tutte le forme di vita sono dotate di orologi circadiani. Di fatto il primo esperimento free-running relativo al ritmo circadiano fu eseguito sulla pianta *Mimosa pudica* (il cui nome italiano è «sensitiva»), che di giorno apre le proprie foglie per esporle al sole e di notte le chiude. Nel 1729 l'astronomo francese Jacques d'Ortous de Mairan pose una *Mimosa pudica* in una stanza completamente buia e osservò

che per una lunga serie di giorni le foglie continuavano ad aprirsi e a chiudersi in sincronia con il tempo esterno. Mairan per primo sembrò non credere ai propri risultati. All'epoca di Mairan una delle sfide scientifiche più pressanti consisteva nel misurare il tempo durante la navigazione in mare, sicché per gli scienziati di quel periodo era difficile accettare l'idea che una pianta priva di pretese avesse un orologio incorporato. Mairan ipotizzò che il «comportamento» della *Mimosa* fosse guidato da qualche segnale, ad esempio dalla temperatura, oppure da qualche ignoto campo magnetico che diceva alla pianta quando aprire e chiudere le foglie. Ci vollero più di due

secoli perché gli scienziati comprendessero che tutte le piante e tutti gli animali possiedono i loro orologi personali, e che persino le singole cellule possono oscillare con un periodo di 24 ore.

Dicendo che una singola cellula oscilla non intendiamo dire che sta effettivamente vibrando al pari di un cristallo di quarzo, e tanto meno che si sta muovendo come un pendolo. Le oscillazioni si riferiscono in questo caso alle concentrazioni di proteine all'interno delle cellule. Le cellule non sono entità statiche: a seconda del lavoro che una cellula sta svolgendo, le diverse proteine ivi presenti cambiano

drasticamente le proprie concentrazioni. Durante i pasti, ad esempio, le cellule delle pareti intestinali aumentano bruscamente la produzione degli enzimi digestivi. Parimenti, quando vi è un rialzo di glucosio nel flusso sanguigno, le cellule del pancreas incrementano la sintesi delle proteine necessarie a produrre l'insulina. Le cellule, inoltre, non sono semplici interruttori regolati da stimoli esterni, ma possiedono propri ritmi interni. Al pari dei topi, anche le singole cellule possono avere un comportamento free-running. Se mantenute a temperatura costante in un ambiente biochimico immutabile, molte cellule manifestano il proprio ritmo circadiano, misurato dal fatto che la

concentrazione di alcune proteine aumenta e cala con un periodo di circa 24 ore. Queste oscillazioni cellulari si possono brillantemente visualizzare mediante un sapiente tocco di ingegneria genetica. Le lucciole emettono luce perché producono l'enzima luciferasi, che in presenza del substrato appropriato (una piccola molecola chiamata luciferina) rilascia energia sotto forma di fotoni. Gli scienziati hanno inserito il gene della luciferasi in cellule di batteri, di muffe, di piante, di fibroblasti e, naturalmente, nei neuroni del nucleo soprachiasmatico. Quando la trascrizione del gene della luciferasi è posta sotto il controllo di una proteina

che per sua natura manifesta un ritmo circadiano, la concentrazione di luciferasi all'interno della cellula oscilla a sua volta. La conseguenza è che le cellule in questione, letteralmente, si illuminano, quindi piano piano si spengono, per poi lentamente tornare a illuminarsi circa 24 ore dopo.

Come fa una singola cellula batterica a sapere che momento del giorno è? Prima di rispondere a questa domanda vale la pena di osservare che una domanda ugualmente appropriata è: *perché ai batteri importa sapere che momento del giorno è?*

Il primo orologio

Vedremo nel [Capitolo 7](#) che, senza la disponibilità diffusa di orologi artificiali accurati, la Rivoluzione industriale sarebbe stata impossibile. Le catene di montaggio, nelle quali operai specializzati eseguivano operazioni seriali all'interno di un processo manifatturiero, richiedevano il coordinamento temporale di un gran numero di lavoratori. Ma qualche tempo prima della Rivoluzione industriale, un miliardo di anni fa o giù di lì, l'evoluzione aveva già creato delle fabbriche e risolto il problema di coordinare temporalmente processi differenti. La più importante catena di

montaggio sul pianeta Terra è la fotosintesi: la serie di operazioni biochimiche che fanno avanzare l'energia dei fotoni solari attraverso una «catena» di proteine per ricavare biomolecole stabili e ricche di energia, la più nota delle quali è il glucosio.

I cianobatteri sono organismi fotosintetici, e la fotosintesi è la loro principale attività diurna. Un imprenditore non pagherebbe i propri dipendenti per starsene tutta la notte in fabbrica con le mani in mano; allo stesso modo un cianobatterio non farebbe che sprecare energia se passasse la notte a sintetizzare le proteine necessarie per la fotosintesi. Sarebbe però vantaggioso se prima del ritorno della luce tali

molecole fossero già pronte a mettersi al lavoro, in modo da sfruttare appieno l'energia solare. La soluzione trovata dall'evoluzione, naturalmente, fu una sveglia interna che anticipa il sorgere del sole. Così una delle forze motrici dell'evoluzione degli orologi circadiani fu la necessità di coordinare in modo altamente adattivo le funzioni cellulari con i cicli di luce e buio prodotti dalla rotazione terrestre.

Il vantaggio evolutivo associato alla capacità di sapere che momento del giorno è – cioè al possesso di un buon orologio circadiano – è stato mirabilmente dimostrato da un elegante esperimento che ha messo in

competizione ceppi differenti di cianobatteri. La [Figura 3.2](#) illustra il ritmo circadiano dei due ceppi usati nell'esperimento, il primo dei quali aveva un periodo di circa 23 ore e il secondo un periodo di circa 30 ore. I ricercatori collocarono i due ceppi nella stessa capsula di Petri e si chiesero se prima o poi un ceppo si sarebbe impadronito dell'intera capsula. L'aspetto ingegnoso dell'esperimento consistette nel predisporre due diversi scenari: uno in cui le luci venivano accese e spente ogni 11 ore, in modo da creare un giorno artificiale di 22 ore (prossimo al periodo naturale dei cianobatteri con ciclo di 23 ore), e un altro nel quale ciò avveniva ogni 15 ore,

così da simulare un giorno di 30 ore. I ricercatori scoprirono che, dopo un mese, le colture sottoposte al ciclo di 22 ore erano dominate dal ceppo col periodo più breve, e che viceversa, quando le colture erano sottoposte a un ciclo di 30 ore, il vincitore risultava il ceppo col periodo più lungo.¹⁰ Un ritmo cellulare di 22 ore all'interno di un giorno di 30 oppure uno di 30 ore in un giorno di 22 erano sincronizzati solo a fasi alterne con la luce, e ne estraevano perciò energia in maniera meno efficiente. Ne consegue che avere un orologio circadiano non basta: per ottenere un vantaggio evolutivo occorre che l'orologio sia in accordo con il

ciclo naturale dell'ambiente.

L'ottimizzazione della fotosintesi è uno dei motivi per cui gli organismi unicellulari possiedono un orologio circadiano, ma potrebbe non essere stato il primo in ordine di tempo. Parimenti essenziale per la vita è infatti la capacità di dividersi e di riprodursi. E un evento chiave della divisione cellulare è la replicazione del DNA, il volume nel quale è scritta la ricetta della vita. È ben noto che la replicazione del DNA è sensibile alla radiazione ultravioletta (UV), il che spiega perché scottature solari ripetute siano un fattore di rischio tumorale per la pelle degli esseri umani e perché le creme solari abbiano etichette che vantano le loro virtù di assorbimento dei

raggi ultravioletti. I pericoli della radiazione UV sono molto più gravi per gli organismi unicellulari, i quali non hanno il vantaggio di avere un organo protettivo come la pelle, ricco di un pigmento (la melanina) che assorbe i raggi ultravioletti. Una cellula che si divide sotto la luce ultravioletta rischia di danneggiare il proprio DNA, un rischio che si attenua di notte. Alcuni cronobiologi sostengono perciò la cosiddetta ipotesi della *fuga dalla luce*, secondo la quale il movente originario dell'evoluzione degli orologi circadiani fu quello di aiutare le cellule a dividersi di notte.[11](#)

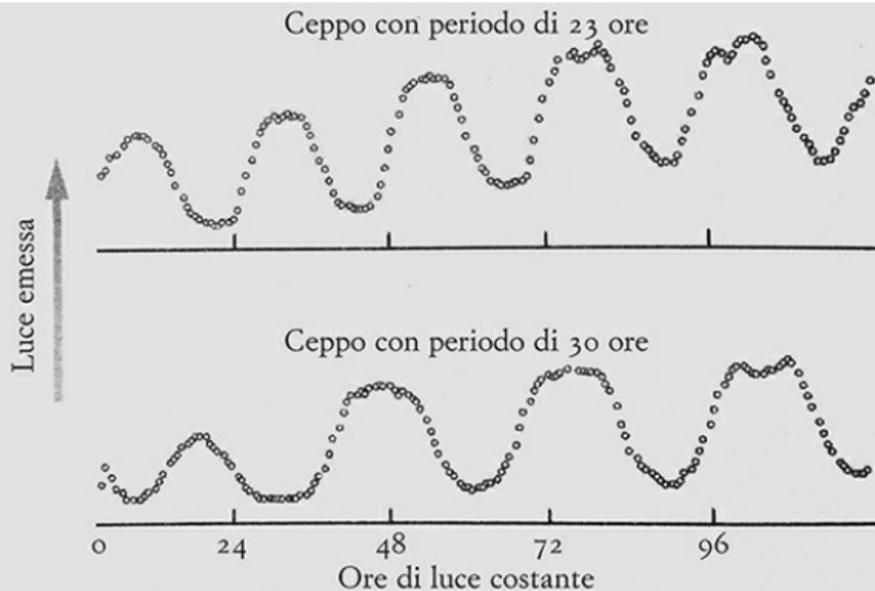


Figura 3.2

Ritmi circadiani lenti e veloci in ceppi di cianobatteri. Ritmi circadiani di due ceppi di cianobatteri con periodi approssimativi di 23 e 30 ore. I batteri furono ingegnerizzati in modo da emettere luce in misura proporzionale alla concentrazione di una determinata proteina. Quando simili ceppi sono costretti a disputarsi le risorse in un ambiente il cui ciclo luce-buio è di 23 ore, prevale il ceppo con periodo di 23 ore; viceversa, se il ciclo luce-buio è di 30 ore, a prevalere è il ceppo con periodo di 30

ore.

[Adattato, previo consenso, da Johnson *et al.*
1998].

Il meccanismo dell'orologio circadiano

Torniamo ora alla domanda principale: *come riesce una singola cellula nell'impresa di capire con precisione che momento del giorno è?* Il primo passo in direzione della risposta fu compiuto al California Institute of Technology dal premio Nobel Seymour Benzer e dal suo allievo Ron Konopka nei primi anni settanta.^{[12](#)} Il laboratorio di Benzer stava studiando il famoso moscerino della frutta *Drosophila melanogaster*, il quale, come tutti i moscerini, comincia la propria vita come larva per poi trasformarsi in pupa e alcuni giorni dopo

emergere nella sua forma adulta. Il processo di trasformazione da pupa a individuo adulto è ben programmato: avviene infatti durante le prime ore del mattino, ricche di rugiada, in modo da evitare la disidratazione causata dal sole. Konopka decise di indagare i meccanismi genetici dell'orologio circadiano servendosi di mutazioni di *Drosophila* nelle quali l'adulto emerge dalla pupa in momenti sbagliati. A questo proposito individuò tre mutanti: uno che emerge dalla pupa in momenti più o meno casuali, uno che emerge in anticipo e uno che emerge in ritardo. In condizioni di oscurità costante gli schemi di attività dei mutanti adulti rispecchiavano le caratteristiche

temporali manifestate in occasione dell'uscita dallo stato di pupa: rispettivamente, gli adulti erano infatti attivi a intervalli casuali nell'arco del giorno, manifestavano un ciclo free-running di sole 19 ore o presentavano un ciclo di lunghezza anomala (28 ore). Konopka era certo che le tre mutazioni riguardassero tutte lo stesso gene, che chiamò *Period*. Più di un decennio dopo un gruppo di ricerca guidato da Michael Rosbash identificò e sequenziò tale gene.¹³ Studi successivi hanno individuato numerosi altri geni che rivestono un ruolo essenziale nel funzionamento dell'orologio circadiano; geni battezzati con nomi temporalmente

evocativi come *Clock* (Orologio), *Cycle* (Ciclo) e *Timeless* (Senza Tempo, Immutabile).

Le modalità con cui questi geni e le proteine da essi prodotte interagiscono per creare un orologio circadiano stabile e altamente affidabile sono piuttosto complesse, ma il principio generale che vi è sotteso è semplice. Così semplice che lo si può vedere all'opera osservando il funzionamento della vaschetta di un water. Ogni volta che tiriamo l'acqua del water attiviamo un ciclo di feedback negativo per ricaricare la vaschetta e impedirle al contempo di traboccare. Il basso livello dell'acqua fa scendere il galleggiante (una sfera collegata a una valvola)

causando in questo modo l'apertura della valvola, dopodiché, man mano che l'acqua risale, il galleggiante sale a propria volta fino a richiudere la valvola. Se facessimo di proposito un buchino nella vaschetta, in modo da causare una piccola perdita di acqua, alla fine il galleggiante scenderebbe abbastanza da riaprire la valvola di carico dell'acqua e riempire nuovamente la vaschetta. Il risultato sarebbe un'oscillazione: il piccolo abbassamento del livello dell'acqua a un certo punto causa l'apertura della valvola di carico, il che fa rialzare il livello dell'acqua fino a richiudere la valvola. L'acqua quindi riprende a

fuoriuscire, e il processo si ripete. Se la vostra vaschetta comincia a emettere rumori misteriosi nel cuore della notte è probabile che stia oscillando a causa di una perdita della valvola di scarico.

Naturalmente l'orologio circadiano è ben più complicato della vaschetta del water, ma l'idea è la stessa, anche se il nome del meccanismo che governa il ciclo dell'orologio circadiano è uno scioglilingua: *ciclo di feedback autoregolativo di trascrizione/traduzione*

(Transcription/Translation Autoregulatory Feedback Loop).

Trascrizione perché i geni codificati nel DNA sono trascritti nell' RNA ; *traduzione* perché questi filamenti di RNA sono

tradotti in proteine; e *ciclo di feedback autoregolativo* perché queste proteine inibiscono ulteriori trascrizioni dei geni che hanno causato la loro sintesi (chiudendo così la valvola dell'acqua). Una di tali proteine è detta *Period*, il prodotto del gene *Period*. La concentrazione di *Period* aumenta fino a spegnere il gene che la sintetizza. Poi, man mano che *Period* a sua volta lentamente si degrada, il gene *Period* riprende la propria attività, facendo nuovamente aumentare la concentrazione della proteina. Indovinate quanto dura questo ciclo?

Un orologio circadiano deve oscillare *stabilmente* con un periodo di

circa 24 ore. Così come gli orologiai del XVIII secolo si sforzarono di ovviare agli effetti che la temperatura esercita sul pendolo e sugli orologi meccanici, l'evoluzione ha dovuto risolvere il problema rappresentato dal fatto che la velocità delle reazioni biochimiche cambia in base alla temperatura. Non abbiamo ancora compreso pienamente come organismi eterotermici quali i cianobatteri, le piante e le mosche riescano a mantenere un periodo di circa 24 ore nonostante le variazioni di temperatura giornaliere e stagionali. Ma sappiamo che esistono molte proteine e molti geni addizionali che interagiscono con il meccanismo molecolare di base del ciclo di feedback autoregolativo di

trascrizione/traduzione, e che probabilmente alcune di queste componenti aggiuntive contribuiscono alla compensazione della temperatura.14

Jet lag

La WWVB, situata vicino a Fort Collins, in Colorado, è una stazione radio importante, benché di una noia abissale. Per tutto il giorno invia il Tempo coordinato universale alle sveglie e agli orologi dell'intero Nord America, o meglio alle sveglie e agli orologi sincronizzabili attraverso un segnale radio. Il nucleo soprachiasmatico svolge un lavoro simile. Il meccanismo molecolare di cui è composto l'orologio circadiano è presente nella maggior parte delle cellule di mammifero. La concentrazione della proteina Period oscilla non solo nei nostri neuroni soprachiasmatici, ma anche in gran parte

delle cellule del nostro corpo.¹⁵ Il compito del nucleo soprachiasmatico è quello di mantenerle tutte in sincronia.

Nelle ore diurne i neuroni soprachiasmatici aumentano marcatamente la loro attività, inviando segnali alle aree del sistema nervoso poste a valle.¹⁶ Il livello di attività di questi neuroni si traduce indirettamente nel nostro essere assennati oppure ben svegli, e serve da segnale di calibrazione indicante la fase del giorno, o almeno la fase nella quale il nucleo soprachiasmatico pensa che si trovi il giorno. Come la maggioranza delle cellule del nostro corpo, i neuroni soprachiasmatici vivono in un'oscurità

perenne, annidati nei recessi del cranio. E ciò solleva la domanda: *come fa il nucleo soprachiasmatico a sapere a che punto è il giorno, cioè se è giorno o è notte?*

Il nucleo soprachiasmatico deve essere sincronizzato da segnali esterni, gli *zeitgeber* (ossia elementi «che danno il tempo»). Lo *zeitgeber* più importante è ovviamente la luce solare. Il fatto che il nucleo soprachiasmatico sia situato all'intersezione dei nervi ottici sinistro e destro non è una coincidenza: si tratta infatti della posizione ideale per ricevere dati grezzi relativi alle condizioni di luce al di fuori del cranio. Queste informazioni aiutano a sincronizzare l'orologio circadiano e

fanno sì che i ritmi interni del corpo siano in fase con la rotazione terrestre. Ma sincronizzare è più facile a dirsi che a farsi.

Chiunque abbia esperienza dell'ottundimento fisico e mentale provocato dai viaggi transmeridiani è testimone delle difficoltà che la reimpostazione dell'orologio circadiano comporta. Dopo un viaggio da Los Angeles a Londra possono passare dei giorni prima che il nucleo soprachiasmatico si risincronizzi: la regola empirica è fino a un giorno per ogni ora di spostamento in avanti dell'orologio circadiano. Viceversa, per farli coincidere con il fuso orario del

luogo, i nostri orologi da polso sono reimpostabili all'istante. Questa differenza rispecchia i due diversi principi che stanno rispettivamente alla base degli orologi artificiali e degli orologi circadiani. La frequenza di oscillazione del cristallo di quarzo della maggior parte degli orologi da polso è 32 768 Hz, per cui un'ora equivale semplicemente a $32\,768 \times 60 \times 60$ ticchettii. Reimpostare l'orologio una volta arrivati a Londra non comporta la necessità di armeggiare con l'oscillatore, ma semplicemente quella di cambiare il conteggio totale dei ticchettii spostando in avanti la lancetta delle ore (o la cifra sul display): una mera formalità. Al contrario, il pendolo

dell'orologio circadiano impiega un giorno intero per compiere una singola oscillazione, sicché reimpostarlo comporta il compito molto più delicato di manomettere l'oscillatore, un compito simile a quello di spostare in avanti un pendolo mentre è in movimento. L'«oscillazione», in questo caso, si riferisce all'aumento e alla diminuzione delle proteine circadiane all'interno delle nostre cellule. È semplicemente impossibile reimpostare all'istante la concentrazione delle proteine circadiane di una cellula, proprio come è impossibile svuotare all'istante una clessidra mezza piena.

All'equatore un fuso orario (pari a 15

gradi di longitudine) corrisponde a una distanza di circa 1600 km. Per attraversare in dodici ore gli otto fusi orari equivalenti a un viaggio da Los Angeles a Londra è dunque necessario viaggiare alla velocità media di oltre 1000 km/h, cioè molto più velocemente di quanto qualsiasi animale riesca a correre, nuotare o volare. Pertanto il jet lag è un disturbo tipicamente contemporaneo, che produce non solo turisti bizzosi e convegni scientifici internazionali popolati da accademici intontiti, ma anche decisioni inadeguate da parte di piloti di aerei, personale militare e diplomatici. Però non tutti i jet lag sono uguali. I viaggi in direzione est pongono problemi di adattamento

maggiori rispetto a quelli in direzione ovest. I primi richiedono un anticipo di fase del nostro orologio circadiano (se viaggiamo da Los Angeles a New York dobbiamo spostare tre ore avanti le lancette dell'orologio) mentre i secondi ne determinano un ritardo di fase. Viaggiare dalla costa ovest alla costa est degli Stati Uniti è un po' come andare a letto presto, mentre il percorso inverso è un po' come stare in piedi fino a tardi, e in maggioranza le persone trovano più difficile coricarsi presto che coricarsi tardi. In accordo con questa visione intuitiva, il jet lag è in genere più gravoso se si viaggia verso est perché gli orologi circadiani sono più difficili

da anticipare che da ritardare, anche se il meccanismo alla base del fenomeno non è ancora stato del tutto chiarito.

Anche i topi sembrano risentire maggiormente del jet lag in direzione est. Quando topi anziani, spostando in avanti di sei ore a settimana il loro ciclo luce-buio, sono sottoposti a condizioni che simulano un jet lag cronico verso est, i loro tassi di mortalità risultano significativamente più elevati rispetto a quelli dei topi il cui ciclo luce-buio viene arretrato di sei ore per settimana in modo da simulare un viaggio in direzione ovest.^{[17](#)}

In lotta con l'orologio

Siete «allodole», presto a letto e presto in piedi, oppure «civette», tardi a letto e tardi in piedi? Questi termini aviari indicano due diversi *cronotipi*. Esiste un questionario diagnostico standard per capire se siete un'allodola o una civetta, che vi domanda ad esempio a che ora preferite coricarvi, in quale momento della giornata vi sentite più svegli e in quale è più probabile che facciate esercizio fisico. I diversi cronotipi riflettono variazioni naturali fra gli individui, variazioni influenzate dall'ambiente e dall'età. Ma, anche quando sono predisposti a essere un'allodola o una civetta, nella maggior

parte dei casi gli individui sono in grado di adattarsi – sia pure contro voglia – a differenti orari di lavoro. Esistono tuttavia persone che fanno una tale fatica a non crollare alle otto della sera che la loro vita sociale e professionale ne risulta compromessa. Tali individui hanno quello che viene definito disturbo del sonno da ritmo circadiano. Verso la fine degli anni novanta del secolo scorso, grazie allo studio di cinque generazioni di una famiglia che annoverava un certo numero di «allodole» estreme, si scoprì che alcuni di questi disturbi hanno una base genetica. Almeno un membro della famiglia – quello che accettò di sottoporsi a un esperimento di

isolamento free-running di 18 giorni – risultò avere un periodo di sonno-veglia di circa 23 ore anziché quello che è il periodo normale negli esseri umani, poco più lungo di 24 ore. Nel 2001 i ricercatori individuarono la mutazione genetica associata a tale *disturbo familiare della fase del sonno anticipata*. Fornendo una straordinaria conferma a decenni di ricerche di base sui moscerini e sui roditori, questo gene – il primo associato a un disturbo circadiano umano a essere identificato – risultò essere il medesimo gene il cui ruolo cruciale per i ritmi circadiani dei moscerini della frutta era stato scoperto negli anni settanta da Benzer e Konopka:

il gene *Period*.¹⁸

Le persone affette dal disturbo familiare della fase del sonno anticipata vivono con un orologio di 23 ore in un mondo di 24 ore. Sono in perenne lotta con il proprio orologio interno. Ma non è necessario avere una mutazione del gene *Period* per essere impegnati in una simile lotta. Nel nostro mondo attivo 24 ore su 24 e 7 giorni su 7, una percentuale significativa di lavoratori è composta da turnisti: operai, piloti, infermieri, medici e poliziotti che lavorano di notte e fanno del loro meglio per dormire durante il giorno. In genere il ciclo sonno-veglia dei turnisti non è sincronizzato con il loro ritmo naturale.

A complicare il problema c'è il fatto che nella maggioranza dei casi i turnisti riadattano in continuazione il proprio ciclo: sono esseri notturni durante la settimana lavorativa ed esseri diurni nel fine settimana. Non sorprende dunque che il lavoro a turni rappresenti un fattore di rischio per numerosi problemi sanitari, fra cui le ulcere, le malattie cardiovascolari e il diabete di tipo 2. Le cause di fondo di tali problemi non sono state ancora del tutto chiarite, ma in parte derivano dallo sfasamento fra i cicli fisiologici interni e gli stimoli esterni. Ad esempio, in genere la produzione di ormoni come l'insulina aumenta in previsione dell'ora normale dei pasti. Uno sfasamento cronico fra il

momento nel quale il corpo si aspetta di essere nutrito e il momento in cui effettivamente lo è sembra essere un fattore predisponente del diabete.¹⁹ Per fare un altro esempio, gli studi sugli animali hanno evidenziato che eliminare geneticamente l'orologio circadiano del pancreas – lasciando intatti gli orologi del nucleo soprachiasmatico e di altri organi – accresce l'incidenza del diabete nei topi. Ciò suggerisce che la coordinazione fra i molti orologi circadiani del nostro corpo sia essenziale per la salute fisiologica.²⁰

L'effetto deleterio causato dal vivere in disaccordo con il proprio ritmo naturale è ben dimostrato, e solleva la

domanda: *sarebbe meglio non avere alcun orologio anziché un orologio costantemente sfasato?*

Sorprendentemente, la risposta potrebbe essere *sì*. Come detto, i criceti con mutazioni dell'orologio circadiano possono avere periodi free-running che durano significativamente di più o di meno di 24 ore. Una di tali mutazioni origina un ceppo dotato di un periodo circadiano intrinseco di 22 ore. Quando si trovano in un mondo di 24 ore, questi mutanti vivono meno a lungo degli esemplari di tipo selvatico. Se però si lesiona il loro nucleo soprachiasmatico la loro vita ne risulta prolungata. Talora una parte del cervello sembra arrecare più danni che benefici: quello appena

descritto è un esempio affascinante di tale situazione.[21](#)

La capacità di programmare con precisione le funzioni fisiologiche e di anticipare il sorgere del sole e l'ora dei pasti quotidiani è un adattamento prezioso, ma se l'orologio circadiano non è in sincronia con il periodo del mondo che ci sta intorno le conseguenze sono così gravi che potrebbe essere meglio non avere affatto un orologio. Nel lontano futuro è possibile che gli esseri umani colonizzino altri pianeti, ed è altamente improbabile che il periodo di rotazione di qualunque pianeta in grado di ospitarci risulti sincronizzato con il nostro orologio circadiano. Marte,

per esempio, ha un periodo di rotazione abbastanza simile a quello terrestre (24 ore e 39 minuti), ma un «giorno» di Mercurio dura oltre 58 giorni terrestri. Perciò, se e quando verrà il momento, forse scopriremo che il modo migliore per non trovarci in perenne lotta con il nostro orologio interno è spegnerlo del tutto.

Il principio dell'orologio multiplo

Gli orologi atomici del National Institute of Standards and Technology sono congegni sbalorditivi non solo per la loro imperscrutabile precisione, ma anche perché sono utilizzati per misurare il tempo sull'intera gamma delle scale temporali: dai nanosecondi agli anni. L'orologio circadiano dentro il nucleo soprachiasmatico misura il tempo su scale diverse? È a lui che dobbiamo la nostra capacità di distinguere una minima da una semibreve, di calcolare se stiamo aspettando di essere serviti al ristorante da un tempo inaccettabilmente lungo, e di gestire il ciclo riproduttivo di ventotto giorni delle donne?

Una delle prime strategie per cercare di rispondere a questa domanda è consistita nel domandarsi se le variazioni di durata del periodo circadiano che si verificano nel corso degli esperimenti di isolamento free-running alterino la capacità di valutare intervalli più brevi. Nel corso di una batteria di esperimenti fu chiesto ai volontari in isolamento di premere un bottone ogniqualvolta pensavano che fosse trascorsa un'ora. Nel corso di un periodo di veglia di 16 ore un soggetto stimò che un'ora durasse circa due ore, e nel corso di un periodo di veglia di 44 ore la sua stima di un'ora risultò prossima alle 3,5 ore. Nel complesso si

riscontrò l'esistenza di una correlazione fra la lunghezza del periodo circadiano degli individui e la loro stima del tempo corrispondente a un'ora. Da ciò si potrebbe arguire che l'orologio circadiano è usato per misurare tutti gli intervalli temporali, compresi periodi molto brevi come l'intervallo tra due accenti successivi in una canzone o la durata del rosso al semaforo. Ma così non è. Quando ai soggetti fu chiesto di premere un bottone per stimare la durata di intervalli compresi fra i 10 e i 120 secondi, non si riscontrò nessun legame significativo fra le stime e il ciclo sonno-veglia di ciascun individuo. L'assenza di qualsiasi correlazione fra il periodo circadiano e le stime temporali

relative a intervalli che vanno dai secondi ad alcuni minuti ben si accorda con l'ampia mole di ricerche da cui si evince che possediamo circuiti differenti per misurare durate di scala differente.²² Per esempio, gli esperimenti rivelano che le mutazioni che perturbano l'orologio circadiano o le lesioni al nucleo soprachiasmatico non alterano la capacità dei roditori di misurare eventi sulla scala dei secondi.²³ (Nel prossimo capitolo vedremo in che modo, di preciso, gli scienziati chiedono agli animali quanto tempo è passato secondo loro).

Anche le nostre conoscenze relative al modo in cui gli orologi circadiani

misurano il tempo ci confermano che essi non contribuiscono alla nostra capacità di misurare il tempo nell'ordine dei secondi. Gli elementi costitutivi e i principi operativi di un orologio circadiano lo rendono incapace di misurare intervalli brevi. Per dirla in altro modo, l'orologio circadiano non ha la lancetta dei minuti, né tanto meno la lancetta dei secondi. I meccanismi biochimici dei cicli di feedback di traduzione/trascrizione sono troppo lenti per poter essere utili quando cerchiamo di calcolare se il rosso del semaforo sta per finire. Ciò non significa che l'orologio circadiano non sia in grado di influenzare la misurazione del tempo su scale differenti; lo è. Ma soltanto perché

i ritmi circadiani condizionano in maniera indiretta un po' tutte le funzioni fisiologiche e cognitive, compresi l'apprendimento, la memoria, il tempo di reazione e l'attenzione: il che spiega perché è meglio non avere piloti con jet lag ai comandi di un aereo, o camionisti in debito di sonno sulle autostrade.²⁴

Come stanno le cose con intervalli più lunghi? Gli orologi circadiani contribuiscono alla temporizzazione di ritmi più lenti, i cosiddetti ritmi *infradiani*? La Luna orbita intorno alla Terra con un ciclo di circa 29,5 giorni. Storicamente, questo ciclo ha lasciato un'impronta profonda sulla cultura umana. La maggior parte dei sistemi

calendariali, compreso il nostro attuale calendario gregoriano, si basa sulle circa dodici lune piene che compaiono nel corso di un anno. Dal punto di vista etimologico la parola inglese *month* (mese) deriva da *moon* (luna). Da molto tempo si ipotizza che le fasi della luna abbiano un ruolo nella fisiologia umana. Ad esempio, come il termine *lunatico* suggerisce, si riteneva che la luna piena fosse in grado di far impazzire le persone; gli studiosi contemporanei pensano che questa credenza sia sorta perché le variazioni degli schemi di sonno innescate dalla luce della luna piena potrebbero aggravare la condizione degli individui affetti da epilessia o da disturbo bipolare. In più,

il fatto che il ciclo mestruale umano abbia una durata molto simile al mese lunare suggerisce che la luna abbia un ruolo nella riproduzione umana. Ma questa appare una pura coincidenza, dato che il ciclo mestruale di altri primati può essere significativamente più lungo o più corto di quello umano. Pertanto, se si prescinde dall'ovvia considerazione che la luce lunare potrebbe alterare il sonno e le attività sociali, pochi indizi fanno pensare che le fasi della luna abbiano un impatto diretto sulla fisiologia umana.[25](#)

La luna, tuttavia, gioca un ruolo importante nella fisiologia di molti animali. Va notato in particolare che

alcuni invertebrati marini sincronizzano lo sviluppo e l'accoppiamento con i cicli lunari. Negli ambienti naturali la luna è la principale fonte di luce notturna, e la luna piena accresce la capacità dei predatori di scorgere le prede, sicché le fasi più vulnerabili dei cicli vitali di alcuni animali coincidono con l'assenza di luna piena. Altri animali si servono della fase lunare per sincronizzare l'accoppiamento. Nelle specie con fertilizzazione interna la riproduzione sessuale richiede che una femmina e un maschio si trovino nel medesimo luogo nello stesso istante. Questo non è necessariamente vero per le specie con fertilizzazione esterna; ciononostante, è importante che il

momento della deposizione delle uova e quello della loro fecondazione grosso modo coincidano. I vermi di mare – invertebrati segmentati parenti dei lombrichi – appartengono a quel genere di creature che, durante la stagione della riproduzione, sfruttano la fase lunare come segnale di sincronizzazione, così da massimizzare le possibilità di incontro fra le uova e lo sperma. Questa fecondazione sincronizzata può far sì che milioni di vermi emergano contemporaneamente in superficie, un fenomeno che in alcune culture si trasforma in un evento gastronomico. Gli indigeni di alcune isole indonesiane lo utilizzano addirittura come segnale di

inizio dei festeggiamenti per l'anno nuovo. [26](#)

La presenza di un orologio interno circalunare nel verme di mare è dimostrabile attraverso quello che è l'equivalente lunare degli esperimenti circadiani free-running. L'orologio circalunare deve per prima cosa essere sincronizzato, non dalla luce solare bensì da quella lunare (o, in laboratorio, mediante l'esposizione a una luce fioca per alcune ore della notte). Se, dopo un periodo di sincronizzazione, i vermi sono sottoposti in laboratorio a un ciclo giorno-notte costante, il loro ritmo riproduttivo manifesta comunque un periodo di 30 giorni. Come fanno i

vermi a sapere quando sono passati 30 giorni? Utilizzano il loro orologio circadiano come un pendolo con periodo di 1 giorno e contano fino a 30? Se così fosse, sabotare l'orologio circadiano modificherebbe certamente il periodo del ciclo riproduttivo. Ma così non avviene: quando ai vermi di mare viene somministrata una sostanza che ne altera il ritmo circadiano, il loro ciclo circalunare di 30 giorni rimane invariato:²⁷ un'ulteriore prova a sostegno del nostro principio dell'orologio multiplo.

Osserviamo dunque che i dispositivi di misurazione del tempo interni al corpo e al cervello sono diversi dagli

orologi costruiti dall'uomo. Un solo orologio artificiale può scandire i millisecondi, i secondi, i minuti, i giorni e i mesi della nostra esistenza. Il principio dell'orologio multiplo ci dice invece che per misurare ciascuna di queste unità di tempo il cervello possiede meccanismi distinti.

Anticipare le variazioni giornaliere della luce, della temperatura e della disponibilità di cibo è così essenziale che praticamente tutte le forme di vita, dai batteri all'*Homo sapiens*, hanno orologi circadiani di alta qualità. Ma l'orologio circadiano non è più adatto a misurare la durata del verde di un semaforo di quanto una clessidra sia

adatta a cronometrare la finale dei 100 metri; è un orologio a una dimensione.

Il tempo di cui si occupa l'orologio circadiano non solo è limitato alle ore del giorno, ma è anche precluso alla coscienza. Sì, ci sentiamo svegli o affaticati a seconda della concentrazione di certe proteine all'interno del nucleo soprachiasmatico, ma non *sentiamo* il momento del giorno allo stesso modo in cui *sentiamo* il calore del sole meridiano. Viceversa abbiamo la percezione soggettiva del passare del tempo e, mentre gli eventi si svolgono, siamo acutamente consapevoli della loro durata. È evidente, come vedremo fra poco, che il cervello possiede altri mezzi per giudicare il passaggio del

tempo. Mezzi che trascendono la misurazione passiva del tempo e generano in qualche modo la sensazione soggettiva del suo scorrere.

4:00

Il sesto senso

Circa 38 anni fa mi trovavo su una strada della Pennsylvania, stavo dormendo sul sedile posteriore di una macchina. Mi svegliai, la guidatrice dormiva anche lei, la macchina stava uscendo di strada, la passeggera accanto a lei allungò il braccio molto lentamente, così parve, afferrò il volante e lo girò con tutta la forza che aveva. Vedo nella mente cosa sta succedendo in quella macchina, c'erano ovviamente urla e rumore, e vedo le bocche spalancate, ma non ho alcun ricordo dei suoni, e lei gira il volante e la macchina sterza bruscamente verso destra, e molto lentamente colpiamo il guardrail, la macchina si capovolge in volo e sento istintivamente che l'intera vita

sta per cambiare. Nella mia mente, il ricordo di un fatto che deve essere durato uno o due secondi sembra un'eternità. Mi svegliai in ospedale e da allora non ho più camminato.

John Hockenberry¹

Durante situazioni nelle quali ci troviamo in pericolo di vita la nostra sensazione soggettiva del tempo può risultare radicalmente alterata, come se tutto si svolgesse al rallentatore. Uno dei primi resoconti scientifici di questo *effetto rallentatore* fu pubblicato da un geologo svizzero, Albert Heim, nel 1892. Heim raccolse le testimonianze dei membri del Club alpino svizzero che erano stati vittime di gravi cadute o di altri incidenti potenzialmente mortali. Il

95 per cento degli interpellati riferì di avere provato ciò che Heim sintetizzò come «una prontezza e una sicurezza mentale dominanti. L'attività psichica è fortissima, la sua velocità o intensità aumenta di cento volte [...] Il tempo appare molto dilatato. Si agisce con la velocità del lampo e si ragiona con esattezza. In numerosi casi segue un'improvvisa visione retrospettiva dell'intera vita dell'individuo».²

Dal momento che i comitati etici ai quali è affidato il compito di autorizzare gli esperimenti sugli esseri umani tendono a disapprovare l'idea di porre i soggetti in situazioni che ne minaccino la vita, è difficile comprovare e studiare

con cura l'effetto rallentatore. Alcune ricerche hanno però chiesto ai soggetti di stimare la durata di esperienze spaventose o impressionanti, come avvertire una scossa di terremoto, guardare un video pauroso, tuffarsi dall'alto su una rete e praticare il paracadutismo sportivo.³ Nella maggior parte dei casi queste ricerche confermano che in genere gli individui sovrastimano la durata dell'esperienza, un risultato coerente con l'impressione che gli eventi esterni si svolgano lentamente (guardare un film al rallentatore richiede più tempo che guardarlo a velocità normale).

Di per sé, tuttavia, la sovrastima

della durata degli avvenimenti che generano emozioni molto intense non è particolarmente sorprendente, perché si dà il caso che esistano infinite altre situazioni, perfettamente innocue, nelle quali gli individui sovrastimano il passare del tempo.⁴ La nostra sensazione soggettiva del tempo è in effetti decisamente imprecisa. *La pentola guardata non bolle mai e Quando ci si diverte il tempo vola* proprio perché sono innumerevoli le circostanze che distorcono il nostro senso soggettivo del tempo. Ascoltare una lezione noiosissima o attendere che il nostro aereo venga riparato mentre siamo già a bordo possono creare la

sensazione della *cronostasi*, cioè la sensazione che il tempo si sia fermato. Al contrario, quando siamo immersi nella lettura di un libro o pratichiamo il nostro hobby preferito, oppure quando siamo completamente assorbiti da un compito complesso come la creazione di un programma informatico, può sembrare che il tempo evapori, balzando magicamente dal momento iniziale a quello finale senza che vi sia niente in mezzo.

Qual è la relazione fra il tempo oggettivo dell'orologio e il nostro senso soggettivo del tempo? Perché il tempo sembra rallentare quando ci troviamo in pericolo di vita? Che cosa accade nel cervello quando diciamo che il tempo

vola o al contrario che procede a rilento? Prima di occuparci di queste domande è necessario tracciare una distinzione fra due diversi tipi di misurazione del tempo.

Misurazione del tempo prospettiva e retrospettiva

Misurare il tempo è un problema bidirezionale. Un cronometro che viene avviato all'inizio di una maratona fornisce una misurazione continua del tempo che impiegano i maratoneti a coprire il percorso di gara, ma non ci dice nulla sulla quantità di tempo che hanno trascorso sulla linea di partenza in attesa del via, e ancor meno sull'ora in cui si sono alzati la mattina. L'uso del cronometro è un esempio di *misurazione prospettiva del tempo*, che consiste nel misurare lo scorrere del tempo dal presente al futuro. Viceversa, se entrate in una stanza appena in tempo per

vedere gli ultimi granelli di sabbia scivolare attraverso il collo di una clessidra, avete qualche elemento per dedurre quanto tempo è trascorso a partire da un certo avvenimento passato: un'ora fa qualcuno ha capovolto la clessidra. Ma, se non la capovolgete nuovamente, la clessidra non vi darà informazioni sul tempo trascorso da quando siete entrati nella stanza. Questo è un esempio di *misurazione retrospettiva del tempo*, consistente nello stimare la quantità di tempo che è trascorso da un dato momento del passato fino al presente.

Nel corso della giornata gli esseri umani sono spesso e volentieri impegnati a eseguire misure prospettive

e retrospettive del tempo. Immaginate due scenari nei quali potreste dovervi servire della capacità di stimare gli intervalli temporali. Nel primo scenario state chiacchierando a una festa con i vostri amici Sara e Matteo; Sara vi chiede di rammentarle di lì a cinque minuti che deve andare via, perché ha un impegno che l'aspetta. Nel secondo scenario Sara si congeda e se ne va, e cinque minuti dopo Matteo vi domanda: «Da quanto tempo è andata via Sara?» In entrambi i casi vi viene chiesto di stimare la quantità di tempo trascorso, ma il vostro cervello usa lo stesso meccanismo nei due casi? No. Dal punto di vista del cervello, si tratta di due

compiti del tutto diversi. Nel primo caso sapete in anticipo che svolgerete un compito di misura: potete perciò far scattare un ipotetico cronometro nell'istante $t=0$ e tenere il conto dello scorrere del tempo fino a quando sono passati cinque minuti circa. Ma nel secondo caso (Matteo che vi chiede da quanto tempo Sara è andata via), il cronometro non vi è di alcuna utilità perché non vi è stato detto quando farlo partire. La misurazione prospettiva del tempo è un autentico compito temporale, in quanto si affida ai circuiti cerebrali che presiedono alla misura del tempo. La misurazione retrospettiva del tempo in un certo senso invece non lo è; è piuttosto un tentativo di inferire il

passaggio del tempo attraverso la ricostruzione degli avvenimenti registrati nella memoria.

La distinzione fra misurazione prospettiva e retrospettiva del tempo spiega alcuni dei misteri riguardanti la nostra sensazione soggettiva del tempo, compreso quello che viene talvolta chiamato il paradosso della vacanza.⁵

Un'attesa di cinque ore dovuta al ritardo dell'aereo che vi deve portare in Grecia può sembrare interminabile nel momento in cui la vivete, mentre una giornata emozionante trascorsa girando per Atene fugge via in un baleno. A distanza di una settimana, però, l'attesa in aeroporto vi apparirà un semplice contrattempo,

mentre l'intensa e appagante giornata ateniese vi sembrerà un'esperienza di notevole durata.

Questo paradosso della vacanza non è un prodotto dello stile di vita odierno, rapido e frenetico. Nel 1890 William James scriveva: «In generale un periodo ricco di esperienze varie e interessanti appare breve mentre si svolge, ma lungo in retrospettiva. Al contrario, un tratto di tempo privo di esperienze appare lungo mentre si svolge, ma breve a posteriori. Una settimana trascorsa viaggiando e ammirando le bellezze dei luoghi visitati può sottendere nella memoria un angolo paragonabile a tre settimane, mentre un mese di malattia difficilmente produce

più ricordi di un giorno». 6

Mentre sono in corso, le occupazioni interessanti e coinvolgenti sembrano scorrere via veloci, anche perché non badiamo al passaggio del tempo. Perciò la vostra prima visita all'antico e venerando Partenone può passare in un baleno, ma quell'attesa di cinque ore all'aeroporto di Atlanta, durante la quale consultate in continuazione il vostro orologio e vi domandate *quanto tempo ancora ci vorrà?*, sembra non finire mai. Retrospectivamente, invece, la durata delle attività viene in parte valutata sulla base del numero di eventi immagazzinati nella memoria. E dato che ricordiamo con maggiore probabilità

fatti nuovi e capaci di trasmetterci dei significati, il Partenone ha più probabilità di ritagliarsi uno spazio nella nostra memoria rispetto alla nostra prima visita alla toilette dell'aeroporto di Atlanta.⁷

La stretta relazione che intercorre fra la memoria e la misurazione retrospettiva del tempo trova una straordinaria esemplificazione nella vicenda del musicologo e musicista britannico Clive Wearing, il quale, dopo una grave infezione cerebrale, ha perduto la capacità di creare nuovi ricordi a lungo termine. Pur essendo molte delle sue facoltà rimaste intatte (compresa la capacità di suonare e

dirigere la musica), all'inizio Wearing passava molto tempo a scrivere nel suo diario «Adesso sono davvero completamente sveglio» e a cancellare più tardi la frase, per poi tornare a scrivere «Adesso sono perfettamente sveglio: prima volta». In assenza della capacità di formare nuovi ricordi, Wearing appare iterativamente intrappolato in un presente imm modificabile. Poiché non è in grado di capire dove si trova o come vi è arrivato, l'unica ipotesi che la sua mente riesce a escogitare è, incessantemente, di essersi appena svegliato. Non ha alcuna nozione retrospettiva del momento in cui si è svegliato, perché di ciò che è accaduto nelle ore o nei minuti

passati ha ricordi scarsi o inesistenti.

La compressione e la dilatazione del tempo

Sulla scala dei secondi le differenze fra misurazione prospettiva e retrospettiva del tempo sono facilmente studiabili, e manipolabili in laboratorio. Uno dei metodi più usuali per alterare sottilmente la percezione del tempo degli individui consiste nel variare il *carico cognitivo* del compito che stanno svolgendo. «Carico cognitivo» non è che un termine ad effetto per indicare il grado di difficoltà di un compito. In uno dei primi esperimenti di questo genere i ricercatori diedero ai partecipanti un mazzo di carte mescolate: a un gruppo fu chiesto di voltare le carte a faccia in su

creando un unico mazzo (carico cognitivo basso), al secondo di creare quattro mazzi diversi dividendo le carte in base al seme (carico cognitivo elevato). A tutti i soggetti fu consentito di svolgere il compito per 42 secondi. Quando i soggetti sapevano in anticipo (caso della misurazione prospettiva del tempo) che sarebbe stato loro chiesto di valutare verbalmente la durata del compito, la loro stima media risultò di 53 secondi nel caso del mazzo unico e di 31 secondi nel caso dei quattro mazzi; quando viceversa i soggetti non sapevano che successivamente sarebbe stato loro chiesto di stimare la durata del compito (caso della misurazione retrospettiva del tempo), i valori

risultarono rispettivamente di 28 e di 33 secondi. Decine di studi successivi hanno accertato che la misurazione prospettiva del tempo è fortemente modulata dal carico cognitivo: più un compito è complesso o impegnativo, più sono basse le stime del tempo che si è trascorso eseguendolo (53 secondi contro 31). Con la misurazione retrospettiva del tempo può accadere il contrario: più il carico cognitivo è elevato, più il compito appare lungo (28 contro 33 secondi). Nondimeno la misurazione retrospettiva del tempo è modulata dal carico cognitivo in maniera meno marcata rispetto alla misurazione prospettiva.⁸

L'importanza della differenza fra le misurazioni del tempo prospettiva e retrospettiva è cruciale. Ad esempio, nella condizione di carico cognitivo basso dello studio appena descritto i soggetti facevano esattamente la stessa cosa (impilare le carte su un singolo mazzo), eppure le stime prospettive e retrospettive erano, rispettivamente, 53 e 28 secondi. Gli studi che provano le ampie differenze fra i due tipi di stima, e la loro correlazione con il carico cognitivo, evidenziano inoltre quanto le nostre valutazioni sullo scorrere del tempo siano imprecise e inaffidabili. La nostra sensazione soggettiva del tempo è influenzata da fattori esterni e interni

così numerosi che, a seconda del contesto, lo stesso intervallo di tempo può facilmente apparirci dimezzato o raddoppiato. Le ricerche hanno dimostrato che tendiamo a sovrastimare di una percentuale che va dal 25 al 100 per cento la quantità di tempo che passiamo in coda al supermercato o in banca, oppure in attesa al telefono. Le aziende ci fanno ascoltare della musica mentre aspettiamo di parlare con un operatore perché alcuni studi suggeriscono che in questo modo abbiamo l'impressione di attendere meno a lungo.⁹

In laboratorio la maggior parte delle ricerche sulla distorsione delle stime

temporali si concentra su intervalli compresi fra le centinaia di millisecondi e alcuni secondi. Tipicamente i volontari siedono davanti a un computer e compiono valutazioni sulla durata di suoni o immagini. In un esperimento condotto dalla neuroscienziata cognitiva Virginie van Wassenhove lo *stimolo campione* era un cerchio statico che compariva sullo schermo per 500 ms (mezzo secondo). Lo stesso cerchio veniva poi presentato per un periodo di tempo più breve o più lungo. Ai soggetti veniva chiesto di indicare se questo *stimolo di confronto* fosse più lungo o più breve dello stimolo campione, premendo l'uno o l'altro di due tasti. In queste condizioni i soggetti tendono a

essere piuttosto precisi: quando lo stimolo di confronto durava 450 ms tendenzialmente indicavano che era più breve di quello campione, mentre quando era di 550 ms in genere lo consideravano più lungo di quello campione. Dunque la durata percepita dello stimolo di confronto è piuttosto accurata. Se però lo stimolo di confronto diventa un cerchio che cresce via via di dimensioni mentre quello campione rimane statico, ecco che emerge un'illusione, una forma di cronostasi o di dilatazione del tempo. L'intervallo associato al cerchio crescente viene infatti percepito come più lungo rispetto a quello dello stimolo campione: è

possibile che i 450 ms di visibilità del cerchio crescente siano percepiti come equivalenti ai 500 ms di visibilità del cerchio statico.[10](#)

La nostra percezione degli intervalli temporali nell'ordine del secondo può essere alterata da una gamma di altre caratteristiche fisiche. Per esempio, la durata degli stimoli uditivi spesso ci sembra maggiore di quella degli stimoli visivi. Persino il valore numerico è in grado di influenzare i giudizi temporali: alcuni studi hanno dimostrato che l'immagine del numero 9 è avvertita come più persistente dell'immagine del numero 1 anche se entrambe sono visualizzate per la stessa quantità di

tempo. La durata degli stimoli nuovi o inattesi ci appare inoltre maggiore di quella degli stimoli familiari o attesi.^{[11](#)}

Uno degli esempi più comuni della facilità con cui la nostra percezione del tempo viene distorta è l'illusione dell'*orologio fermo*. Forse avete provato questa illusione girando lo sguardo verso un orologio analogico dotato di lancetta dei secondi. Volgendo gli occhi all'orologio potreste aver pensato: «Perbacco, l'orologio si è fermato»; ma non avete fatto in tempo a finire questo pensiero che avete capito di essere in errore, dato che la lancetta alla fine si è mossa. L'illusione dell'orologio fermo insorge perché la

pausa nel movimento della lancetta dei secondi sembra durare più a lungo di quanto il nostro cervello pensa che debba durare un secondo. L'illusione pare essere causata dal fatto che, nel breve volgere di un secondo o ancor meno, le nostre azioni, in questo caso spostare lo sguardo, possono falsare la nostra percezione del tempo.¹² È come se, nel momento in cui spostiamo la nostra attenzione, un cronometro all'interno del cervello cominciasse a ticchettare un po' più velocemente, accumulando un numero maggiore di ticchettii per unità di tempo e inducendoci così a sovrastimare il tempo trascorso. L'illusione

dell'orologio fermo e altre illusioni temporali provano che la nostra sensazione soggettiva del tempo è appunto tale: non oggettiva.



Mezzogiorno di fumo

Figura 4.1
Paul Noth/The New Yorker Collection/The
Cartoon Bank.

Cronofarmacologia

Come ci ricorda la vignetta della [Figura 4.1](#), la nostra percezione del tempo può essere radicalmente alterata dalle sostanze psicoattive. Non sorprende che ciò non sia sfuggito all'attenzione di William James, che ne fa cenno basandosi sulla propria esperienza personale: «Nell'intossicazione da hashish si verifica un curioso aumento della prospettiva temporale apparente. Pronunciamo una frase e prima di concluderla il suo inizio sembra già risalire a un tempo indefinitamente lontano». ¹³ In effetti chi ne fa uso riferisce spesso che fumare marijuana

pare avere l'effetto di rallentare il tempo. C'è un aneddoto su due hippy, fatti di marijuana, seduti su una panchina nel Golden Gate Park a San Francisco; sopra le loro teste sfreccia un jet e uno dice all'altro: «Accidenti, pensavo che non se ne andasse più». [14](#)

Prima di procedere è bene osservare che affermazioni come «Il tempo rallenta / vola / non passa mai / accelera» possono essere fonte di grande confusione, [15](#) soprattutto se commettiamo l'errore di interrogarci sul loro significato effettivo. Si prenda l'espressione *Il tempo è volato*: sottintende che l'orologio alla parete sembra andare più veloce o più piano?

Se qualcuno riferisce che *il tempo è volato*, questo significa che in un dato intervallo di tempo meccanico oggettivo dell'orologio ha fatto più o meno cose? Le affermazioni concernenti l'accelerazione o la rapidità del tempo sono intrinsecamente ambigue. Più lento e più veloce sono aggettivi comparativi, perciò, proprio come quando diciamo che qualcosa è a sinistra oppure a destra, occorre fornire un punto di riferimento. In genere, quando parliamo di distorsioni temporali, intendiamo dire che il tempo esterno varia rispetto a un ipotetico orologio interno. Supponiamo che questo immaginario orologio interno governi le nostre valutazioni di tempo prospettive per durate che vanno dai

millesimi di secondo ai minuti, e che il suo ritmo sia di 10 ticchettii al secondo. Se dovesse mettersi a ticchettare 20 volte al secondo per effetto di una minaccia o di una droga, il risultato sarebbe che, nel caso di un intervallo pari a 5 secondi, avremmo l'impressione che di secondi ne siano passati 10. Una simile accelerazione dell'orologio interno sarebbe generalmente descritta come «rallentamento» o «dilatazione» del tempo perché siamo autoreferenziali: adottiamo come riferimento il nostro orologio interno e abbiamo perciò l'impressione che il tempo esterno rallenti. Questa descrizione,

naturalmente, dipende dall'orologio scelto come riferimento: si potrebbe anche asserire, al contrario, che il tempo scorre più rapidamente, dato che l'orologio interno sta andando più veloce di quello esterno. Giusto o sbagliato che sia, per convenzione le affermazioni circa il rallentamento o l'accelerazione del tempo si intendono riferite alla velocità apparente di un orologio esterno rispetto a un ipotetico orologio interno, sebbene sia ovviamente l'orologio interno ad accelerare o rallentare. Nei media e nella letteratura scientifica e divulgativa non è inusuale trovare esempi nei quali si sostiene erroneamente che il tempo rallenta, quando ciò che si vuole

affermare è invece che il tempo accelera. Esaminiamo la vignetta della [Figura 4.1](#): se il THC , la sostanza attiva dell'hashish e della marijuana, genera la sensazione che il tempo esterno rallenti (in accordo con l'osservazione di William James e con l'evidenza sperimentale) – il che equivale a dire che il tempo interno accelera –, il cowboy della figura non dovrebbe scoprire che sull'orologio non è ancora mezzogiorno? Più in generale, è importante notare che la nostra impressione del ritmo di scorrimento del tempo non è necessariamente equivalente alle nostre stime esplicite circa la quantità di secondi o di minuti

trascorsi (posso stimare di essere stato sotto i ferri del dentista per cinque minuti e al contempo avere l'impressione che la seduta sia durata un'ora).[16](#)

Sebbene non si debba prendere alla lettera, l'idea che dentro di noi ci sia un orologio che ticchetta offre una metafora utilissima per riflettere sulla nostra percezione del tempo. Spesso gli studi farmacologici interpretano le distorsioni temporali come variazioni della velocità di un orologio interno. Ad esempio, numerose ricerche di laboratorio realizzate con soggetti umani confermano i resoconti aneddotici indicanti che sotto l'effetto della

marijuana il tempo rallenta, un risultato interpretabile come un'accelerazione dell'orologio interno. In uno dei primi studi in materia, ai soggetti venne semplicemente chiesto di dire al ricercatore quando ritenevano che fossero passati 60 secondi dal momento di un segnale d'inizio. Dopo che fu loro somministrata una dose orale di THC , i soggetti formularono stime significativamente inferiori rispetto a quelle che avevano formulato prima della sua somministrazione: con il THC in circolo i partecipanti attendevano solo 42 secondi prima di affermare che era trascorso un minuto, mentre le loro stime precedenti erano assai vicine a 60

secondi.¹⁷ Era come se il loro orologio interno andasse più veloce, raggiungendo 60 in un tempo oggettivo di soli 42 secondi (si noti che la stima è minore del valore reale perché i soggetti dovevano «produrre» un minuto; se il loro compito fosse stato quello di stimare la durata di un minuto effettivo, un orologio interno più veloce di quello esterno avrebbe generato una sovrastima).

Le droghe condizionano anche il senso del tempo degli animali. Il che solleva la questione: come si domanda agli animali quanto tempo a loro giudizio è passato? I ratti e i topi possono prontamente imparare a

premere una leva per ottenere cibo; in una variante di questa forma canonica di condizionamento operante, detta *rinforzo a intervallo fisso*, un segnale, ad esempio una luce che si accende, indica l'inizio della prova (cioè, $t = 0$). Nel corso di essa il ratto può premere la leva a suo piacimento, ma riceve una ricompensa sotto forma di cibo solo per la prima pressione della leva eseguita dopo che è trascorso un intervallo predeterminato dall'inizio della prova. I ratti imparano a cominciare a premere la leva dopo un tempo proporzionale all'intervallo fisso su cui sono addestrati. Così, se l'intervallo fisso adottato durante l'addestramento è di 10 secondi, è più probabile che i ratti

premano la leva una volta trascorsi circa 10 secondi. E i ratti addestrati a un intervallo di 10 secondi premono la leva prima di quelli addestrati a un intervallo di 30 secondi. Questo è uno dei molti modi per dimostrare che i roditori e altri animali sono in grado di misurare prospettivamente il tempo per durate dell'ordine dei secondi. La domanda è: che cosa accade se, una volta appreso il compito (un obiettivo che può richiedere settimane di addestramento), i topi agiscono sotto l'effetto di droga? In un esperimento nel quale i ratti erano stati addestrati a un intervallo fisso di 30 secondi, il tempo di picco scese da circa 34 secondi in assenza di droga a circa

29 secondi dopo la somministrazione di THC (è interessante notare che in questo studio i ratti risultarono in certo qual modo più accurati sotto l'effetto del THC). Questo risultato è coerente con i resoconti umani indicanti che il tempo rallenta sotto l'effetto della cannabis perché l'ipotetico orologio interno è troppo rapido, anche se, specialmente nel caso dei cannabinoidi, tali conseguenze sulla misurazione del tempo non sono universalmente attestate.[18](#)

L'effetto cronofarmacologico sulla percezione del tempo negli animali che risulta meglio studiato è quello riguardante la manipolazione del sistema

dopaminico del cervello. La dopamina è un importante neurotrasmettitore, e un modulatore di molti processi cerebrali diversi. In particolare, è il danno a un gruppo di neuroni produttori di dopamina situati nella substantia nigra a causare i tremori e i deficit motori che caratterizzano il morbo di Parkinson. Lo psicologo della Duke University Warren Meck e i suoi colleghi hanno avanzato l'ipotesi che la dopamina sia in grado di alterare la velocità dei circuiti di misurazione del tempo presenti nel cervello. I loro esperimenti hanno dimostrato per esempio che, dopo aver addestrato i ratti a un intervallo fisso di 20 secondi, la somministrazione dello stimolante metanfetamina – i cui effetti

includono l'aumento dei livelli di dopamina nel cervello – può anticipare il momento della pressione della leva da 20 a 17 secondi; tuttavia, dopo aver ripetuto per giorni il compito sotto l'effetto della metanfetamina, i ratti riadattarono lentamente la loro misurazione tornando a 20 secondi, come se avessero imparato a operare con un orologio interno cronicamente più veloce ricalcolando il numero di ticchettii corrispondente a 20 secondi. Inoltre, quando i ratti cessavano di ricevere la droga «sforavano»: il tempo di picco della pressione sulla leva superava i 20 secondi.¹⁹

Questi e molti altri studi

farmacologici offrono importanti contributi alla comprensione dei processi per mezzo dei quali gli esseri umani e gli animali misurano e percepiscono il tempo. Ma l'interpretazione di tali ricerche è impegnativa ed è oggetto di dibattito. In primo luogo, i risultati dipendono spesso dalla natura del compito adottato, dall'intervallo oggetto di studio e dalle modalità specifiche con cui i soggetti riferiscono la loro percezione della quantità di tempo trascorsa. In secondo luogo, poiché praticamente tutte le droghe hanno effetti neurofisiologici molteplici e interconnessi, è molto difficile individuare la causa effettiva di una determinata variazione di

comportamento. Ad esempio, i cannabinoidi e le sostanze dopaminergiche possono influire sui livelli di ansia, sulla memoria, sull'attività motoria e su stati fisiologici come la fame (il che potrebbe incidere sulla motivazione degli animali a eseguire un compito). E, inutile a dirsi, queste droghe possono alterare anche la quantità di attenzione che i soggetti umani e animali sono disposti a dedicare al compito loro proposto, e ciò può dare origine a una serie di interpretazioni alternative. Inoltre alcune droghe possono influire sulle valutazioni che i soggetti umani forniscono degli intervalli brevi, ma non su quelle che

danno degli intervalli lunghi, e viceversa.²⁰ Nel complesso, la letteratura scientifica sull'effetto che le sostanze psicoattive esercitano sulla percezione del tempo indica che non è un unico neurotrasmettitore a governare tale percezione. Per di più, dato che la stessa droga può condizionare in maniera divergente le stime degli intervalli brevi e quelle degli intervalli lunghi, si può concludere che gli studi farmacologici forniscono solide prove a sostegno della tesi secondo cui non esiste un orologio interno primario che presiede alla misurazione del tempo dai millesimi di secondo fino alle ore: una conclusione che milita a favore del

nostro principio dell'orologio multiplo.

Cause dell'effetto rallentatore

Abbiamo visto che le distorsioni della nostra percezione del tempo dovrebbero essere considerate la regola anziché l'eccezione, il che rende un po' meno arcane le distorsioni temporali riferite da chi si è trovato in pericolo di vita o in altre situazioni che generano emozioni molto intense. Eppure l'effetto rallentatore descritto da coloro che hanno provato tali esperienze conserva un rilievo speciale, perché costituisce ben di più che una semplice sovrastima del tempo trascorso. Esistono alcune ipotesi che potrebbero spiegare questo effetto.²¹ Ne citerò tre, che chiamerò le ipotesi dell'*overclocking*,

dell'*ipermemoria* e della *metaillusione*.

Overclocking Se la CPU del vostro computer opera a 2 GHz significa che svolge due miliardi di operazioni al secondo. Questa velocità è controllata dal «clock» (orologio) del computer. La funzione del clock non è quella di indicare l'ora del giorno bensì di regolare la frequenza delle operazioni nella CPU, nel nostro caso inviando un impulso elettrico ogni 0,0000000005 secondi. Ogni appassionato di videogiochi sa che è possibile «overclockare» il proprio computer, aumentando il numero di impulsi al secondo che sono generati dal clock. Il risultato è un computer che in pratica fa

tutto più velocemente: a parità di tempo, può ricevere ed elaborare una quantità maggiore di informazioni (il rovescio della medaglia è che la CPU potrebbe fondersi). Forse l'effetto rallentatore è causato dall'equivalente neurale dell'overclocking di un computer digitale: la capacità di reagire più velocemente e di percepire gli avvenimenti al rallentatore potrebbe essere dovuta al fatto che, nei momenti in cui si è in pericolo di vita, il cervello entra in modalità di overclocking.

Il cervello può essere «overclockato»? Il tempo che occorre al cervello per eseguire un compito è determinato da molti fattori diversi, fra i quali: 1) la velocità con la quale i

segnali elettrici (i potenziali d'azione o «picchi») viaggiano lungo gli assoni; 2) la quantità di tempo che occorre al segnale elettrochimico a livello di sinapsi per essere trasmesso dal neurone presinaptico a quello postsinaptico (il *ritardo sinaptico*); e 3) la quantità di tempo impiegata dalle correnti sinaptiche per variare il voltaggio del neurone in misura sufficiente a innescare un potenziale d'azione (ciò è in parte determinato dalla cosiddetta *costante di tempo* del neurone). La velocità di conduzione degli assoni e i ritardi sinaptici sono determinati in larga parte da eventi biofisici e biochimici piuttosto rigidi, ed è improbabile che risultino

accelerati in maniera significativa in occasione di una reazione attacco-o-fuga. Viceversa, il tempo occorrente a un neurone per attivarsi in risposta a una raffica di stimoli proveniente dalle sue cellule presinaptiche potrebbe essere accorciato attraverso un certo numero di meccanismi.^{[22](#)} Uno dei modi più semplici per immaginarsi come ciò possa avvenire è il seguente: i neuromodulatori (come la norepinefrina) che inondano il cervello e il sangue durante le situazioni attacco-o-fuga potrebbero depolarizzare i neuroni eccitatori nel cervello (o diminuirne l'inibizione), facilitando, e rendendo un po' più veloce, la loro attivazione.

Tuttavia è improbabile che le variazioni della latenza di attivazione dei neuroni generino incrementi di velocità superiori al 10 o al 20 per cento. Ad esempio, vi sono evidenze indicanti che gli stimolanti, compresa la caffeina, possono diminuire il tempo che impieghiamo a rispondere a uno stimolo (il tempo di reazione), ma di una percentuale in genere inferiore al 10 per cento.^{[23](#)} Attraverso meccanismi ancora scarsamente chiariti i neuromodulatori possono potenziare e affinare l'attenzione che rivolgiamo agli eventi intorno a noi. Ed è ben assodato che la performance e il tempo di reazione possono essere migliorati

dall'attenzione. Ma, benché verosimilmente migliorino le prestazioni spettacolari di un atleta professionista, simili effetti non sono in grado di spiegare perché le testimonianze riferiscano che in situazioni estreme «si agisce con la velocità del lampo e si ragiona con esattezza» e «segue un'improvvisa visione retrospettiva dell'intera vita dell'individuo».

È verosimile che le notizie di salvataggi complessi e fulminei compiuti in situazioni di elevato pericolo siano spesso inesatte. E quando gesta simili effettivamente si verificano è probabile che i loro autori siano in prevalenza individui altamente addestrati: piloti di auto da corsa, piloti di caccia, atleti di

sport estremi. In altre parole, persone i cui circuiti neurali hanno tratto vantaggio da migliaia di ore di addestramento. Per citare le parole di un ricercatore: «I kayakisti provetti sono in grado di gestire lo scafo, il corpo e la pagaia in modo tale da seguire esattamente l'unico percorso navigabile lungo le rapide e le cascate. I partecipanti meno esperti sono invece disorientati, ed è probabile che si blocchino, siano colti dal panico o compiano azioni che accrescono il pericolo».²⁴ Se molti ricercatori mettono in evidenza le gesta sovrumane attribuite a individui trovatisi in situazioni di rischio estremo, le

descrizioni di individui che nelle stesse situazioni prendono decisioni sbagliate di certo non scarseggiano. Forse allora si può affermare che, in situazioni che mettono a repentaglio la vita, l'aumento della capacità di attenzione e il perfezionamento delle abilità motorie derivanti dall'addestramento consentono ai professionisti di agire con la massima prontezza; invece il resto di noi – sebbene percepisca gli avvenimenti al rallentatore – si agita a vuoto o si paralizza.

Ipermemoria Un'altra possibile spiegazione dell'effetto rallentatore è che si tratti di un'illusione a posteriori, ossia che i soggetti coinvolti in un

incidente non percepiscano realmente gli avvenimenti al rallentatore, ma *credano*, mentre li richiamano alla memoria, di averli percepiti in questo modo. È possibile che nel corso delle situazioni attacco-o-fuga il cervello aumenti la risoluzione spaziale e temporale dei nostri ricordi. In altre parole, nel momento del pericolo la velocità percepita con la quale gli eventi si palesano sarebbe più o meno normale, ma a posteriori i ricordi risulterebbero molto più dettagliati, creando l'impressione retrospettiva che tutto sia avvenuto al rallentatore. In una testimonianza relativa all'effetto rallentatore un soggetto che aveva rischiato di essere ucciso da un treno in

arrivo riferì che «mentre il treno passava ho visto il macchinista in viso. Era come un film proiettato a velocità ridotta in cui i fotogrammi si susseguono a scatti. Il suo viso l'ho visto così». [25](#)

Ma come facciamo ad appurare se questo fenomeno è stato generato in fase di ricordo o se si è davvero prodotto nel corso dell'episodio? Inoltre, come facciamo a sapere se i fatti sono rievocati con esattezza (il soggetto sarebbe in grado di riconoscere il viso del macchinista)? È provato che i nostri ricordi di esperienze ad alto contenuto emotivo possono essere decisamente inaffidabili. Sappiamo, ad esempio, che esistono molti casi di vittime di reati

violenti le quali, chiamate a fornire la propria testimonianza oculare, hanno indicato il sospetto sbagliato.²⁶

Ciononostante appare probabile che una qualche versione dell'ipotesi dell'ipermemoria contribuisca a spiegare l'effetto rallentatore, poiché i neuromodulatori rilasciati durante eventi pericolosi o ad alto contenuto emotivo sono effettivamente in grado di rafforzare la memoria. Si ritiene che questa sia una spiegazione dei cosiddetti *ricordi flash*, il fenomeno in virtù del quale ci ricordiamo di dove eravamo nel momento in cui abbiamo avuto notizia di fatti tragici, come ad esempio gli attentati dell'11 settembre. Il disturbo da

stress post traumatico è un altro esempio nel quale la reazione attacco-o-fuga potenzia la memoria, dando origine, in questo caso, a ricordi maladattivi e di intensità opprimente.^{[27](#)}

L'ipotesi dell'ipermemoria, naturalmente, non spiega perché certi individui agirebbero più rapidamente e con più lucidità rispetto ai loro comportamenti normali. Né spiega la spesso incoercibile sensazione soggettiva che l'effetto rallentatore si verifichi proprio nel momento del pericolo. Qui non posso evitare di farmi influenzare dalla mia esperienza personale. In occasione di un incidente automobilistico la mia auto fu colpita di

fianco, ruotò su se stessa e andò a sbattere contro un palo del telefono. Nel corso dell'incidente non solo ebbi la precisa sensazione che l'auto stesse ruotando su se stessa con lentezza, ma pensai anche, nitidamente: «Wow, il tempo rallenta davvero». Tuttavia, sottolineare che in momenti simili la percezione è ben lungi dall'essere perfetta, non ricordo di aver reagito rapidamente e neppure di essermi accorto che gli airbag laterali si stessero aprendo. In ogni caso il fatto che io ricordi di aver pensato che il tempo rallentava sembrerebbe suggerire che in effetti ho avuto l'impressione, *durante l'incidente*, che gli eventi si svolgessero al rallentatore, e dunque che l'ipotesi

dell'ipermemoria non è in grado di spiegare appieno l'effetto rallentatore.

Metaillusione Un punto debole sia dell'ipotesi dell'overclocking sia dell'ipotesi dell'ipermemoria consiste nel fatto che tali congetture non tengono conto di una caratteristica fondamentale delle esperienze soggettive. Che riguardino il colore, il suono o lo scorrere del tempo, fondamentalmente le nostre esperienze coscienti sono illusioni: utili, incessanti narrazioni di quelli che il cervello inconscio reputa essere gli eventi più rilevanti che si svolgono nel mondo extracranico. La natura illusoria delle esperienze soggettive può risultare un concetto

strano (su cui ritorneremo nel [Capitolo 12](#)); per il momento il modo forse più convincente per illustrarlo consiste nel ricorrere all'esempio della consapevolezza corporea. Di tutte le esperienze soggettive una delle più profonde ed esclusive è che la mia mano è *mia* e di nessun altro. Quando col martello manchiamo il chiodo e ci colpiamo involontariamente il dito *sentiamo* dolore. Sebbene il dolore sia prodotto nel cervello, sorprendentemente non lo sentiamo localizzato nel cervello; lo proiettiamo invece al di fuori di quest'ultimo, nel punto dello spazio dove si trova il nostro dito. Il carattere illusorio della consapevolezza corporea è messo in

evidenza dalla sindrome dell'arto fantasma. Alcuni pazienti che hanno subito l'amputazione di un arto continuano a sentire l'arto mancante con la stessa intensità con la quale la maggior parte di noi sente i propri arti in carne ed ossa. Gli arti fantasma ci dicono che il cervello è così impegnato a creare un'illusione di possesso delle ossa, dei muscoli e dei nervi di cui sono fatti i nostri arti, che talvolta continua a generare questa illusione anche quando l'arto non c'è più da molto tempo. In realtà, perciò, l'illusione non è l'arto fantasma, bensì il senso di possesso dei nostri arti effettivi. La sindrome dell'arto fantasma è un fenomeno

sconcertante, ma focalizzarci troppo sul mistero degli arti fantasma ci distoglie dal vero, originario mistero: il modo in cui il cervello crea la consapevolezza del nostro corpo.²⁸ Analogamente, concentrarci sull'effetto rallentatore che insorge in situazioni di pericolo estremo ci distoglie dal vero mistero: la nostra percezione "normale" dello scorrere del tempo.

Immaginate di trovarvi in una stanza vuota: si proietta un film e ci mettete poco a capire che la sua velocità è completamente sbagliata. Le labbra si muovono al rallentatore e gli oggetti impiegano troppo tempo a cadere. Come rimediare? Se non avete nessuna idea

del modo con il quale il film viene proiettato, o del tipo di macchina che sta generando la proiezione, come fate a capire per quale motivo il film è proiettato alla velocità sbagliata? In fin dei conti, per quanto riguarda il proiettore, la velocità «corretta» non è che uno dei molti livelli di regolazione possibili. Il nostro normale senso del tempo è un costrutto mentale, che a sua volta sembra avere diversi livelli di regolazione della velocità. L'ipotesi della metaillusione pone l'accento sul fatto che l'effetto rallentatore è un'illusione di un'illusione, sicché cercare di spiegare tale effetto senza studiare il nostro normale senso soggettivo del tempo è come cercare di

correggere la velocità di un film lento ignorando il modo in cui si produce la velocità corretta.

La coscienza è un resoconto differito non solo di ciò che accade nel mondo esterno, ma anche di ciò che avviene nel cervello inconscio. Ad esempio, come vedremo nel [Capitolo 12](#), osservando l'attività neurale che si svolge all'interno del cervello è possibile prevedere, fino a 900 millisecondi prima che ciò avvenga, quando i soggetti decidono volontariamente di alzare il dito; in altre parole, la previsione può precedere di centinaia di millisecondi il momento in cui i soggetti sembrano essere consapevoli di avere

“liberamente” deciso di muovere il dito. Perciò, anche se il pericolo spingesse il cervello in una modalità di overclocking – accelerando le nostre azioni – la coscienza potrebbe essere troppo lenta per guidare tali azioni. E, di conseguenza, la sensazione di «una prontezza mentale dominante come dimostrato dall’accresciuta velocità di pensiero»²⁹ potrebbe non essere altro che un ulteriore raggiro che il cervello inconscio compie ai danni della mente.

Il cervello può dunque proiettare la sensazione del dolore nel mondo in cui si trovano i nostri arti, ma non solo: quando vicino al nostro braccio vero viene posto un braccio finto, può infatti

accadere che il cervello ricalibri la sua proiezione del luogo nel quale percepisce il braccio vero spostandola verso la posizione del braccio finto, come se fosse incline ad accettare il braccio finto come proprio (l'illusione in questione è detta della *mano di gomma*). Così come è in grado di proiettare in punti differenti dello spazio la posizione percepita dei nostri arti, il cervello sembra possedere anche la capacità di etichettare gli eventi come *veloci* oppure *lenti*. In altre parole, le nostre valutazioni soggettive circa la velocità con cui scorre il tempo possono essere dissociate dalla velocità con cui il cervello elabora le informazioni, o dalla velocità del clock interno del

cervello.^{[30](#)}

Per sottolineare ulteriormente la rilevanza dell'ipotesi della metaillusione, si tenga presente che durante gli avvenimenti che mettono a rischio la vita non è solo il nostro senso del tempo a risultare alterato. Le tre testimonianze che seguono sono tratte da una raccolta di oltre cento testimonianze pubblicata nel 1976.^{[31](#)} La prima è di un pilota di auto da corsa ventiquattrenne che procedeva a 160 km orari quando ebbe un incidente che fece capottare più volte la sua auto e la proiettò in aria a nove metri di altezza:

Sembrava che l'intera faccenda durasse

all'infinito. Tutto era al rallentatore e mi sembrava di essere un attore in scena e di potermi vedere mentre nella macchina continuavo a rotolare. Era come se fossi seduto sugli spalti e vedessi tutto ciò che accadeva.

Uno studente universitario di ventun anni, coinvolto in un grave incidente automobilistico, raccontò:

Per tutto l'episodio il tempo si fermò. Sembrava che, perché qualcosa accadesse, ci volesse un'eternità. Anche lo spazio era irreali. Era come essere seduto al cinema e guardare le cose svolgersi sullo schermo.

E un soldato la cui jeep era saltata su una mina durante la seconda guerra mondiale riferì:

Non avevo alcuna coscienza del passaggio del tempo, solo del momento, immutabile. Né avevo nozione dello spazio, dato che la mia esistenza sembrava solo mentale.

Sembra dunque che la percezione del tempo non sia l'unica facoltà mentale a essere alterata: lo è anche la percezione dello spazio. Di fatto, in qualunque altro contesto, le testimonianze sopra riportate sarebbero definite allucinazioni o stati alterati. È possibile che l'improvviso afflusso di sostanze neurochimiche endogene provocato dalla reazione attacco-o-fuga sovraccarichi i circuiti cerebrali inducendo delle allucinazioni. Forse, pertanto, la strategia migliore è

considerare l'effetto rallentatore un tipo di stato alterato, scisso dalla realtà più di quanto non le sia connesso.

La compressione del tempo nel cervello

Le tre ipotesi sopra descritte non sono spiegazioni mutuamente esclusive dell'effetto rallentatore. Sospetto che l'accresciuta capacità di attenzione contribuisca alle azioni fulminee che professionisti ben preparati effettuano in occasione di situazioni adrenaliche, e che probabilmente l'ipermemoria giochi un ruolo nell'effetto rallentatore, ma che in ultima analisi la velocità con cui percepiamo lo svolgersi degli eventi sia un livello di regolazione in certa misura arbitrario, sotto la superficie del quale è all'opera la molto più misteriosa illusione della coscienza.

Consideriamo l'effetto rallentatore e altre illusioni temporali come distorsioni della nostra percezione del tempo – più specificamente della nostra percezione della velocità con cui le cose cambiano –, ma in realtà la questione non è così semplice. La nostra capacità di comprimere e dilatare il tempo è infatti una caratteristica del cervello di cui ci serviamo quotidianamente.

Qual è l'ultima parola della frase iniziale della vostra canzone preferita? Se siete come me dovete partire dal principio per arrivare alla fine: *How many... man walk... him a man?*³² Ma di certo non avete bisogno di riprodurre mentalmente la frase con il tempo

originale della canzone. Potete riprodurla nella mente molto velocemente oppure lentamente: percorrendo in maniera accelerata il testo oppure assaporandone ogni sillaba. La nostra capacità di eseguire la stessa azione a velocità differenti è una caratteristica importante del nostro sistema motorio. Rallento il discorso quando sto parlando a dei bambini piccoli e lo accelero quando sono a corto di tempo durante una lezione. Potete allacciarvi le scarpe con lentezza se state insegnando a un bambino come si fa, o rapidamente quando avete fretta di andare a correre, e con l'occhio della mente potete immaginare di allacciarle in un tempo minore di quanto occorra

nella realtà. La nostra capacità di accelerare o rallentare le nostre azioni motorie varia di un fattore approssimativamente pari a cinque: per esempio, i tempi musicali variano in genere da 40 a 200 accenti al minuto. Ma esistono dati indicanti che il cervello è in grado di rivivere gli avvenimenti a velocità ancora maggiori.

Nel [Capitolo 1](#) abbiamo citato le cellule di posizione dell'ippocampo. Si tratta di cellule che si attivano selettivamente quando un ratto si trova in un luogo specifico all'interno di una stanza. Così, quando un ratto esplora un'area aperta, ad esempio passando per i luoghi $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$, ci saranno dei

neuroni che si attiveranno per ciascuno di questi luoghi. Se contrassegniamo tali neuroni con le lettere da *A* a *E*, osserveremo uno schema di cellule che si attivano nel tempo (lo chiamerò una *traiettoria neurale*): $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$. Possiamo considerare tale schema come la firma neurale dell'esperienza vissuta dal ratto compiendo il percorso in questione. Il ratto potrebbe impiegare dieci secondi per compiere il percorso, sicché la traiettoria neurale $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ si svolgerà nell'arco della stessa quantità di tempo. Ora, la cosa affascinante è che quando i neuroscienziati registrano l'attività delle medesime cellule mentre l'animale dorme o riposa, constatano che lo

schema di attività neurale $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ si ripete più spesso di quanto ci si aspetterebbe se si trattasse di un fenomeno casuale, cioè più spesso rispetto al caso in cui il ratto non avesse precedentemente compiuto il percorso $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ nel corso della giornata. Un'interpretazione di questi risultati è che il cervello del ratto stia riproducendo gli episodi vissuti in precedenza. Ma questi eventi riprodotti si svolgono su una scala temporale totalmente diversa: durante la riproduzione può accadere che la sequenza $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ duri solo 200 millisecondi anziché 10 secondi. Si ritiene che la riproduzione di queste

traiettorie possa contribuire alla formazione dei ricordi, aiutando a immagazzinare nei circuiti cerebrali gli episodi vissuti (è importante sottolineare che nessuno sta sottintendendo che durante la ripetizione i ratti rivivano a livello conscio l'esperienza del percorso; è probabile che ciò non avvenga). È anche possibile che questa riproduzione rappresenti la pianificazione di azioni future. Per esempio, quando i ratti eseguono un compito nel quale devono fermarsi presso piccole "stazioni di ricompensa" per ottenere una gratifica e poi procedere verso la fonte successiva, lo schema di attività neurale osservato durante la sosta nella stazione è

utilizzabile per prevedere dove il ratto si dirigerà subito dopo!³³

Un'interpretazione di questa scoperta è che il cervello del ratto stia pianificando in una frazione di secondo azioni il cui svolgimento potrebbe richiedere 10 secondi. La riproduzione compressa delle traiettorie neurali, insieme alla constatazione che siamo in grado di controllare la velocità con cui riproduciamo una canzone nella mente, dimostra che il cervello può effettivamente elaborare e generare schemi temporali variandone la velocità. Rimane tuttavia aperta la questione se questa caratteristica del funzionamento cerebrale sia collegata alla

compressione e alla dilatazione soggettive del tempo oppure no.

Il nostro «senso» del tempo non è un vero e proprio senso come la vista o l'udito. Non esiste un organo del tempo, non esistono recettori del tempo negli occhi, nelle orecchie, nel naso, sulla lingua o sulla pelle. Né potrebbe essere altrimenti, dato che il tempo non è una proprietà fisica simile alla luce o alla pressione variabile delle molecole dell'aria. Ciononostante il cervello non solo misura il tempo, ma ne coglie il flusso: sembra che sentiamo il tempo scorrere. Una gran quantità di illusioni temporali mostra però che la nostra percezione del tempo può divergere

radicalmente dal tempo oggettivo dell'orologio, e a tali illusioni viene spesso attribuita grande importanza. Ma l'esistenza di illusioni temporali non è sorprendente. Praticamente tutte le esperienze soggettive, comprese la percezione del colore e del dolore, nonché la consapevolezza corporea, sono alterate dal contesto, dall'apprendimento, dall'attenzione, e dalle droghe. Tali illusioni hanno fornito a psicologi e neuroscienziati elementi preziosi per capire il funzionamento del cervello, ma alla fine la lezione più importante da trarne è forse che, distorte oppure no, tutte le esperienze soggettive sono fondamentalmente delle illusioni. Perciò non dovremmo permettere alle

illusioni temporali di distoglierci troppo dall'indagare un enigma più profondo: in che modo, anzitutto, il cervello genera la sensazione cosciente dello scorrere del tempo, nonché di qualunque altra cosa?

5:00

Schemi nel tempo

Excuse me while I kiss this guy
(«Scusate se bacio questo tizio»)

Attribuito a Jimi Hendrix

Anche se forse non vi prestiamo molta attenzione, nel corso di qualunque conversazione il nostro cervello è intento a misurare diligentemente la durata di ogni sillaba, le pause fra ogni parola nonché il ritmo complessivo del flusso di suoni che colpisce le nostre membrane timpaniche.

I fonemi sono la più piccola unità del

linguaggio: costituiscono il repertorio di suoni utilizzato in ciascuna lingua (esiste una corrispondenza approssimativa tra fonemi e lettere, ma può accadere che una stessa lettera rappresenti fonemi diversi, come nel caso della *c* in *cibo* e *carta*). Nella maggior parte dei casi il significato può essere desunto dall'ordine dei fonemi all'interno di una successione di parole. In alcuni casi, tuttavia, la stessa sequenza di fonemi può assumere significati molto diversi e dare perciò origine a coppie di vocaboli e di espressioni potenzialmente ambigue:

Great eyes («Occhi straordinari») /

Gray ties («Cravatte grigie»)

Marco ha detto: il capo è un incapace /

Marco, ha detto il capo, è un incapace

In genere tali ambiguità possono essere chiarite da altre dimensioni del linguaggio, fra cui la durata delle sillabe, l'intonazione, l'accento e le pause fra le parole. Ad esempio, uno dei modi più semplici per disambiguare le due sequenze sopra citate consiste nell'enfatizzare le pause nei punti appropriati. Nel secondo esempio una pausa più lunga fra *detto* e *il capo* implica che è il capo (secondo Marco) a essere incapace, mentre due pause marcate inserite rispettivamente prima e dopo l'inciso indicano che l'incapace (secondo il capo) è Marco. Anche la velocità del discorso serve a trasmettere

significati e informazioni. Si prenda la frase inglese:

The hostess greeted the girl with a smile.

(«La padrona di casa accolse la ragazza col sorriso»)

Chi è che sorrideva? Le ricerche dimostrano che velocizzare (comprimere temporalmente) il segmento *girl with a smile* orienta a pensare che fosse la ragazza a sorridere, mentre rallentarlo (dilatazione temporale) favorisce l'interpretazione secondo cui a sorridere era la padrona di casa.¹

Una conseguenza tragica di simili ambiguità è che ci sono persone le quali canticchiano le loro canzoni preferite

usando parole sbagliate. I fraintendimenti possono derivare dal fatto che a volte i cantanti devono forzare le parole per adattarle al ritmo della canzone (accade peraltro che certi testi siano fraintesi semplicemente perché i cantanti non sono pagati in base alle loro capacità di dizione). In inglese esiste addirittura un termine specifico per indicare questo tipo di storpiature: *mondegreen*. Il verso di *Purple Haze* di Jimi Hendrix «*Excuse me while I kiss the sky*» («Scusate se bacio il cielo») ha dato origine a un famoso *mondegreen*: «*Excuse me while I kiss this guy*» («Scusate se bacio questo tizio»). Di nuovo, come nel linguaggio parlato, queste potenziali ambiguità sono in parte

legate alla distribuzione dei tempi, e possono essere chiarite marcando mediante delle pause i confini di parola corretti.

I tempi sono anche importanti per discriminare i singoli fonemi. Per esempio, in inglese la distinzione fra *p* e *b* è in parte basata sul cosiddetto *tempo di inizio della sonorità* (*voice-onset time*): l'intervallo che intercorre fra il rilascio esplosivo dell'aria dalla bocca e la vibrazione delle corde vocali. Se un inglese posa le dita sulla gola mentre dice *pa* probabilmente avvertirà un intervallo fra il momento in cui apre la bocca e il momento in cui sente le corde vocali che iniziano a vibrare. Quando fa

la stessa cosa pronunciando *ba* l'intervallo risulterà più breve e probabilmente impercettibile. Nel caso di *pa* il tempo di inizio della sonorità è generalmente superiore ai 30 millisecondi, nel caso di *ba* è inferiore ai 20 millisecondi. Il fatto che un inglese sia facilmente in grado di udire la differenza fra le sillabe *ba* e *pa* significa che il sistema uditivo possiede dei meccanismi di misurazione temporale finalizzati a distinguere questi brevissimi intervalli.

Su una scala leggermente più lunga, che va dalle centinaia di millisecondi ad alcuni secondi, i tempi sono cruciali per la *prosodia* (il ritmo o la musicalità del parlato). Ricorriamo all'intonazione,

alla distribuzione dei tempi e alla velocità del discorso per comunicare emozioni, sarcasmo o il carattere affermativo o interrogativo di una sequenza di parole. La frase *È stata una bella idea* suona come un complimento oppure come una critica a seconda della prosodia con cui viene pronunciata. Le ricerche dimostrano che cambiare il ritmo del discorso comprimendo o dilatando temporalmente le frasi modifica la valutazione dello stato emotivo di chi parla. Udendo frasi che sono enunciate per esprimere tristezza, i partecipanti agli esperimenti individuano correttamente lo stato emotivo del parlante. Quando la velocità

delle frasi viene aumentata, generalmente i partecipanti ritengono che il parlante sia spaventato o si trovi in una condizione emotiva neutra. È importante osservare che le emozioni espresse dalla prosodia sono in grado di trascendere le lingue. Allorché, nell'ambito di un esperimento, a soggetti americani che non sapevano il tedesco furono fatte ascoltare frasi in questa lingua, le loro valutazioni circa le emozioni del parlante ricalcarono quelle dei madrelingua tedeschi. Analogamente, se le frasi venivano filtrate in modo tale da rendere le parole inintelligibili ma da preservare il «profilo» complessivo del discorso, gli ascoltatori riuscivano ancora a

desumere lo stato emotivo del parlante (immaginate di ascoltare una conversazione che vi giunge attutita di là da un muro: anche se non riuscite a distinguere i singoli vocaboli, siete probabilmente in grado di capire se esprimono rabbia o gioia).²

I tempi sono divertenti

I tempi sono considerati un elemento cruciale della comicità. Non sono certo che questa osservazione sia stata verificata in laboratorio... o mediante studi su animali, ma l'attore Sacha Baron-Cohen – nel suo film *Borat. Studio culturale sull'America a beneficio della gloriosa nazione del Kazakistan* – ha fornito una divertente dimostrazione della massima secondo cui nella comicità i tempi sono tutto. In una scena del film un insegnante di umorismo è impegnato a spiegare la complessità temporale di una «battuta non».³ Benché non particolarmente spiritoso, l'enunciato seguente è, almeno

in potenza, dotato di forza comica:

That suit is black. Not! («*Quel vestito è nero. No!*»)

Borat cerca di riprodurlo con:

That suit is not black.

That suit is black not.

That suit is black. Not!

Tutte soluzioni che hanno un potenziale comico notevolmente inferiore. Ma perché una tempistica adeguata contribuisce a rendere efficace una battuta? La comicità è in parte legata alla sorpresa. Affinché qualcosa sia spiritoso deve essere inaspettato e in pari tempo conservare un senso: la conclusione della frase *That suit is*

black, garbanzo beans («Quel vestito è nero, ceci») è inaspettata, ma non particolarmente divertente.⁴ Un ulteriore requisito dell'umorismo potrebbe essere che l'inatteso si deve verificare al momento giusto. Il cervello genera in continuazione previsioni in tempo reale su *che cosa* sta per accadere e *quando*: forse l'inaspettata battuta finale dovrebbe avvenire all'interno della finestra temporale a cui si riferiscono tali previsioni. Se arriva troppo presto non può risultare sorprendente, perché non c'è abbastanza tempo per creare una previsione su ciò che sta per accadere. D'altra parte, se arriva troppo tardi l'ascoltatore è già mentalmente

impegnato con l'insieme successivo di previsioni: l'elemento di sorpresa è che nulla è accaduto, il che genera perplessità anziché divertimento.

Il mammese

Chiunque abbia provato a imparare una lingua da adulto si è probabilmente lamentato della rapidità di discorso dei madrelingua.⁵ Ascoltare una lingua straniera è paragonabile al tentativo di riconoscere un volto tra la gente che affolla la banchina di una metropolitana mentre le sfrecciamo davanti a bordo di un vagone: il cervello fatica ad agganciare un volto preciso, perché le facce si mescolano le une con le altre. Rallentare il discorso aiuta il principiante ad analizzare le sequenze di fonemi isolando i singoli vocaboli.

È presumibile che i bambini piccoli incontrino difficoltà analoghe allorché

imparano la propria lingua madre, ed è probabilmente per questo che, quando si rivolgono ai bambini piccoli, gli adulti rallentano automaticamente il discorso e pronunciano le parole con enfasi. Questa variante dei nostri schemi prosodici viene chiamata lingua rivolta agli infanti o «mammese», «maternese», «genitorese». La lingua rivolta agli infanti è spesso caratterizzata da una maggiore altezza dei suoni e dall'allungamento delle vocali e delle pause fra una parola e l'altra. Le ricerche mostrano ad esempio che, quando gli adulti parlano fra loro, le pause tra sintagmi durano circa 700 millisecondi, mentre quando parlano ai bambini tale valore sale fino a superare

il secondo. Le ricerche confermano inoltre che, al pari degli adulti che cercano di apprendere una nuova lingua, i bambini distinguono meglio le parole quando si parla loro con la prosodia rallentata ed enfatica del mamese.⁶ Parlare più lentamente aiuta i bambini e gli adulti ad analizzare il discorso: ad apprendere dove comincia una parola e dove ne finisce un'altra, a evitare che fonemi consecutivi interferiscano gli uni con gli altri. Nel prossimo capitolo vedremo che ciò sembra essere una conseguenza del modo in cui il cervello elabora i flussi di informazione e misura intervalli compresi fra le decine e le centinaia di millisecondi.

La lingua parlata è multidimensionale: sono molte le variabili che vi contribuiscono, fra cui la sequenza dei fonemi, l'intervallo fra di essi, la durata delle sillabe, le pause fra le parole, l'intonazione, l'accento, la velocità del discorso e la prosodia complessiva. Molti di questi fattori presuppongono che il cervello di chi ascolta misuri il tempo. Analogamente, chi parla deve impegnarsi nei compiti motori necessari a generare la struttura temporale del discorso, fra cui una complessa serie di contorsioni della lingua, movimenti labiali eseguiti al momento giusto, vibrazioni delle corde vocali, pause e una respirazione ben

sincronizzata. Nel complesso, i cervelli tanto degli ascoltatori che dei parlanti devono risolvere un sofisticato insieme di problemi temporali, un compito che probabilmente va al di là delle capacità di qualunque apparato il cui funzionamento somigli a quello di un orologio.

Il codice Morse

Abbiamo visto che gli esseri umani e altri animali si dedicano a un'ampia gamma di compiti temporali, misurando il tempo che il suono impiega per arrivare da un orecchio all'altro, la durata del semaforo rosso o quella della rotazione terrestre. Tali compiti si basano sulla misura di durate o intervalli isolati: l'equivalente temporale della valutazione della lunghezza di un oggetto. Viceversa, cogliere il linguaggio e la musica richiede l'individuazione di complessi schemi temporali: l'assemblaggio di molti elementi temporali così da comprendere l'insieme.

Il tempo sta al riconoscimento del linguaggio e della musica come lo spazio sta al riconoscimento visivo degli oggetti. Possiamo pensare al riconoscimento di un volto in un disegno come a un problema spaziale, nel senso che le informazioni pertinenti sono contenute nelle relazioni spaziali fra gli elementi del disegno. È inoltre un problema di gerarchia: informazioni di basso livello (linee e curve) devono essere integrate in un'immagine unificata. Un cerchio è un cerchio, ma due coppie affiancate di cerchi concentrici diventano occhi; collocatele in un cerchio più grande e avrete una faccia, e così via, fino a quando otterrete

una folla di persone. Il riconoscimento del linguaggio e della musica è l'equivalente temporale del riconoscimento di una scena visiva: richiede la risoluzione di una serie di problemi temporali ordinati gerarchicamente.⁷ Nel caso del linguaggio occorre analizzare le caratteristiche temporali di elementi progressivamente più lunghi: fonemi, sillabe, parole, sintagmi e frasi. Per certi aspetti riconoscere una gerarchia di schemi temporali è più impegnativo, perché richiede qualche genere di memoria del passato. Tutte le caratteristiche di un disegno sono simultaneamente presenti su un pezzo di

carta statico, mentre l'integrazione delle caratteristiche salienti del linguaggio o della musica ha luogo nel tempo; in altre parole, ciascun elemento va interpretato nel contesto di elementi che sono già svaniti nel passato.

Il codice Morse costituisce forse il miglior esempio di quanto sia raffinata la capacità del cervello di processare schemi temporali. Il linguaggio e la musica si basano su informazioni codificate nella struttura temporale dei suoni, ma un'ampia quantità di informazioni è da essi trasmessa anche attraverso l'altezza dei suoni. Possiamo concepire l'altezza sonora come un'informazione spaziale, paragonandola all'orientazione di una

linea su un foglio di carta. La cosa può creare un po' di confusione perché l'altezza si riferisce alla percezione della frequenza sonora, e la frequenza è una proprietà intrinsecamente temporale misurata in cicli (ossia oscillazioni complete dell'onda sonora) per secondo. La frequenza sonora, tuttavia, è rappresentata spazialmente dalle cellule sensoriali uditive (le *cellule ciliate dell'organo di Corti*) disposte lungo la coclea. Perciò, se ci poniamo nella prospettiva del sistema nervoso centrale, distinguere l'altezza dei suoni è un compito essenzialmente spaziale (come analogia si pensi al pianoforte, i cui tasti sono disposti in ordine di

altezza). Il codice Morse è indipendente da ogni sorta di altezza o di informazione spaziale: nel codice Morse i tempi *sono* tutto.

Il codice Morse è composto da due elementi fondamentali: i *punti* e le *linee*. Tali simboli differiscono l'uno dall'altro solo per la durata, sicché il codice Morse richiede un unico canale comunicativo, ad esempio un tono o una luce che compare e scompare secondo qualche elaborato schema temporale. Questa semplicità rende il codice facile da trasmettere. Grazie a esso i messaggi possono perfino essere inviati attraverso il battito delle palpebre. Un caso famoso è quello dell'ammiraglio americano Jeremiah Denton. Fatto prigioniero

durante la guerra in Vietnam, Denton fu intervistato alla televisione a scopo di propaganda e a una domanda rispose: «Ricevo cibo e vestiario adeguati, e assistenza medica quando ne ho bisogno». Ma, mentre diceva questo, con il battito delle palpebre trasmise il seguente messaggio: TORTURE.⁸

La durata del punto e della linea dipende dalla velocità complessiva del codice Morse, misurato in parole al minuto. Alla velocità di 10 parole per minuto la durata di ciascun

punto e di ciascuna linea è
rispettivamente di 120 e 360
millisecondi. Ma anche le
pause trasmettono
informazione: la pausa fra una
lettera e l'altra è di 360 ms (il
triplo della durata di un punto)
e la pausa fra una parola e
l'altra è di 840 ms (sette volte
la durata del punto). Lo
schema

— — — — — .. — — — — — .. — — — — — ..

corrisponde a *what is time* («che cos'è
il tempo»). Le pause più lunghe

rappresentano le interruzioni di parola. Tutta l'informazione è veicolata dalla durata dei toni, dagli intervalli che li separano e dalla loro struttura complessiva. Ma, come nel parlato, anche nel codice Morse esiste una prosodia, e sembra che gli esperti siano in grado di individuare i «parlanti» dalle leggere differenze temporali che contraddistinguono i loro messaggi, ossia dai loro «accenti». Per un orecchio non allenato ascoltare un messaggio in Morse è un'attività molto simile a quella di ascoltare una lingua straniera: è impossibile percepire quando finisce una lettera e comincia quella successiva. Ciascun nuovo tono

va ad aggiungersi a quello precedente, rendendo impossibile distinguere le due sequenze

... .. (*she*) (*lei*)

e

.... .. (*his*) (*suo*)

Naturalmente un esperto non ha bisogno di contare consapevolmente questi punti e di fare mente locale sui confini fra una lettera e l'altra: non più di quanto abbiamo bisogno, mentre distinguiamo *neurone* da *neutrone*, di soffermarci a riflettere se abbiamo udito la lettera *t* oppure no.

Allora come si diventa esperti di codice Morse? Un po' alla volta. Per imparare non si comincia al ritmo di 20 parole al minuto: si parte con velocità basse e le si va via via aumentando. Un metodo consigliato consiste nell'adottare la cosiddetta velocità Farnsworth: le lettere sono trasmesse a velocità normale ma le pause fra le lettere e le parole vengono messe in risalto allungandone la durata. Ciò permette ai discenti di imparare le lettere come un unico «oggetto temporale», marcando i confini fra ciascuna lettera e ciascuna parola in modo da ridurre le interferenze reciproche.⁹ In altri termini, il codice

Morse si impara partendo dal suo
mammese.

Imparare a misurare il tempo

Anche per chi è digiuno di codice Morse distinguere un punto di 120 ms da uno di 360 ms è relativamente facile. Analogamente, in campo musicale, è facile distinguere una nota di 250 ms da una nota di 500 ms (rispettivamente, una croma e una semiminima a 120 battiti al minuto). Ma come fa il cervello a compiere queste semplici distinzioni temporali? La misurazione del tempo migliora con l'esercizio? La risposta a queste domande offre un contributo importante alla comprensione del modo nel quale il cervello misura il tempo.

Si potrebbe supporre che per misurare gli intervalli che vanno da

alcuni millisecondi a circa un secondo il cervello adoperi una sorta di cronometro neurale valido per tutti gli usi. All'opposto, si potrebbe ipotizzare che il cervello possieda una moltitudine di neuroni o circuiti differenti, ciascuno specializzato nell'individuare un determinato intervallo, quasi si trattasse di una serie di clessidre diverse, una per ciascun possibile intervallo. Per cercare di mettere alla prova queste due ipotesi possiamo domandarci se e in quale modo l'esercizio migliori la nostra capacità di individuare gli intervalli.

Sebbene la discriminazione fra gli intervalli sia oggetto di studio fin dalla fine del XIX secolo, solo negli anni novanta del secolo scorso questa

domanda ha trovato una risposta definitiva. Uno dei primi studi che affrontarono sistematicamente la questione fu svolto all'Università della California, a San Francisco, da Beverly Wright, da me e dai nostri colleghi Henry Mahncke e Michael Merzenich. Utilizzammo un tipico compito di discriminazione degli intervalli, nel quale i soggetti udivano due intervalli diversi e dovevano decidere quale dei due fosse il più lungo. Ciascun intervallo era delimitato da due brevi segnali sonori (ognuno di durata pari a 15 ms). Il primo intervallo era ad esempio un *intervallo standard* di 100 ms, mentre il secondo, il cosiddetto

intervallo di confronto, durava ad esempio 125 ms ([Figura 5.1](#)). La differenza fra l'intervallo standard e l'intervallo di confronto è detta *delta-t* (Δt). Se, quando gli sono proposti intervalli di 100 e di 125 millisecondi, il partecipante individua sempre correttamente l'intervallo più lungo, possiamo concludere che il suo contatore interno di tempo ha una risoluzione migliore di (inferiore a) 25 millisecondi.

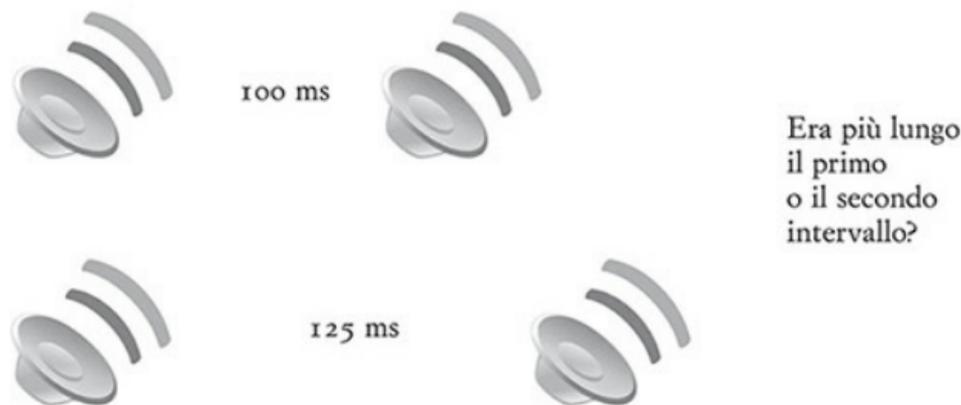


Figura 5.1
Test di discriminazione degli intervalli.

Variando il valore Δt è possibile stimare la precisione dei cronometri cerebrali. In primo luogo stimammo la soglia dei soggetti nel caso di intervalli standard da 50, 100, 200 e 500 ms. La prima cosa da notare è che tali soglie variavano in misura elevata da un intervallo all'altro, secondo una proprietà generale del modo in cui gli

esseri umani distinguono stimoli di grandezza diversa. È probabile infatti che riusciate a cogliere l'esistenza di una diversità di peso fra un oggetto di 100 grammi e uno di 125 grammi, ma non fra un oggetto che pesa 1000 grammi e uno che ne pesa 1025. In linea generale ciò che conta non è la differenza assoluta fra i due stimoli ma il rapporto relativo fra di essi. Le soglie di discriminazione degli intervalli andavano all'incirca dal 15 al 25%. Ad esempio, per l'intervallo standard di 100 ms la *soglia media di discriminazione degli intervalli* era 24 ms, il che significa che in media i soggetti riuscivano a distinguere in modo affidabile 100 ms da 124 ms.

Dopo aver raccolto nel primo giorno dell'esperimento questi dati di riferimento iniziali, i soggetti furono sottoposti a un periodo di addestramento di dieci giorni, nel corso del quale si esercitarono a individuare gli intervalli di 100 ms per un'ora al giorno. Al termine di questo periodo le capacità di misura dei soggetti risultavano chiaramente migliorate: la soglia media per l'intervallo standard di 100 ms passò da 24 a 10 ms. Ciò porta a pensare che in qualche modo l'esercizio potenzi effettivamente la qualità dei cronometri del nostro cervello. Ma gli esseri umani sono creature complicate; forse l'addestramento non migliorava la

capacità di misura vera e propria ma semplicemente la capacità dei volontari di concentrarsi sul loro compito. Fortunatamente la risposta a una seconda, più interessante domanda confutò quest'ultima interpretazione.

Avendo migliorato la loro capacità di individuare l'intervallo di 100 ms oggetto dell'addestramento, i soggetti avrebbero mostrato progressi anche quando si trattava di distinguere gli altri intervalli? Si noti che, se crediamo che il cervello possieda una sorta di cronometro neurale preposto alla misurazione di tutti gli intervalli compresi fra 50 e 500 ms, e se crediamo inoltre che con l'esercizio tale cronometro diventi in

qualche modo più preciso, ci aspetteremmo che la capacità di misura migliori per tutti gli intervalli, anche se i volontari si sono esercitati solo su quello da 100 ms. Viceversa, se il cervello utilizza cronometri specializzati, allora è prevedibile che i miglioramenti relativi all'intervallo standard di 100 ms non si estendano agli altri intervalli. E così è: benché dieci giorni di addestramento sugli intervalli di 100 ms avessero notevolmente potenziato la capacità dei soggetti di distinguere intervalli intorno ai 100 ms, la soglia di discriminazione per gli intervalli di 50, 200 o 500 ms non migliorò in alcun modo.¹⁰ Se il

progresso relativo all'intervallo di 100 ms fosse derivato da una maggiore capacità di concentrazione, verosimilmente i soggetti avrebbero migliorato la loro prestazione anche nel caso degli altri intervalli, ma questo non è ciò che osservammo. Cosa ancora più importante, questo risultato, che da allora è stato replicato in numerosi altri studi,^{[11](#)} suggerisce che, qualunque esso sia, il meccanismo mediante il quale il cervello misura il tempo per durate inferiori a un secondo non sembra fare capo a un cronometro generale in grado di misurare tutti i possibili intervalli.

È ragionevole pensare che, se la capacità di misurare il tempo migliora

con la pratica, le persone occupate in professioni che richiedono di scandirlo con precisione – ad esempio i musicisti – ottengano in questo ambito risultati superiori alla media. Uno dei primi studi dedicati alla questione venne svolto da Richard Ivry e colleghi all'Università dell'Oregon. Essi chiesero a pianisti e non pianisti semplicemente di premere un bottone in sincronia con una serie di segnali sonori proposti ogni 400 ms, e quindi di battere il tempo con lo stesso ritmo una volta che i segnali erano cessati. Gli intervalli fra un battito e l'altro generati dai musicisti risultarono significativamente più regolari rispetto a quelli dei non musicisti. Parimenti, i pianisti risultarono più bravi a svolgere

un compito di discriminazione degli intervalli relativo a un intervallo standard di 400 ms.¹² Un altro studio dimostrò inoltre che le soglie di discriminazione degli intervalli dei musicisti sono significativamente più basse nel caso di intervalli standard di 50 e di 1000 ms. Ma anche fra i musicisti esistono differenze considerevoli. È stato dimostrato ad esempio che i percussionisti distinguono gli intervalli di 1 secondo meglio dei suonatori di archi.¹³ Nel complesso le ricerche evidenziano che, in una serie di compiti temporali, i musicisti ottengono generalmente risultati almeno del 20% migliori di quelli conseguiti dai non

musicisti.

Tenere il tempo

La musica, in una forma o nell'altra, è presente in tutte le culture umane. Un ingrediente chiave della musica è l'accento: il «battere» periodico che sta a fondamento del ritmo di una canzone. La nostra tendenza naturale a gravitare verso l'accento di una canzone tamburellando o muovendo su e giù la testa è un ulteriore esempio del fatto che il cervello umano è una macchina predittiva. Non battiamo il piede *in risposta* a ciascun accento (spesso marcato battendo su uno strumento a percussione); al contrario, il nostro cervello si proietta in avanti di alcune centinaia di millisecondi per prevedere

quando si realizzerà l'accento successivo, e sincronizza i nostri movimenti per agire di conseguenza. Sincronizzare i nostri movimenti al ritmo di una canzone è così naturale che a volte ci è più facile continuare a tamburellare che reprimere il richiamo del ritmo. Eppure la maggior parte degli animali non possiede la semplice capacità di tenere il tempo.

Non solo perché gli animali non condividono le nostre predilezioni musicali, ma anche perché sembrano essere privi delle capacità sensorie necessarie a sincronizzare i loro movimenti con uno stimolo periodico. A questo punto ogni utente esperto di YouTube farà obiezione, invocando

l'abbondanza di graziosi animali domestici che muovono allegramente il capino al ritmo di qualche canzone pop. Alcuni di questi video sono probabilmente esempi fortunati dell'effetto Clever Hans: animali che hanno imparato a cogliere i segnali provenienti dai loro padroni, come il famoso cavallo Hans, il quale effettuava calcoli aritmetici seguendo gli indizi fornitigli dai movimenti involontari del suo padrone. Altri filmati tuttavia, in particolare quelli che hanno per protagonisti gli uccelli, potrebbero non essere illusori.

Gli scienziati certamente non disdegnano di arruolare i loro soggetti

sperimentali sulla base dei filmati di YouTube. Una ricerca condotta dallo psicologo Aniruddh Patel e dai suoi colleghi reclutò la star di YouTube Snowball, un grazioso cacatua bianco.¹⁴ In uno dei suoi video Snowball si produceva in una serie di movimenti del corpo e del capo – che non si possono descrivere altrimenti che come danza – al ritmo di *Everybody* dei Backstreet Boys. Per appurare se Snowball seguisse effettivamente il ritmo anziché compiere una serie di movimenti mnemonici prefissati, i ricercatori rallentarono o velocizzarono la canzone, e verificarono in quale rapporto si ponessero i

movimenti di Snowball col ritmo della canzone; se per ciascun accento il capo era sempre più o meno nella stessa posizione estesa, si poteva desumere che i suoi movimenti fossero in sincronia con il ritmo. I movimenti di Snowball si rivelarono chiaramente tali per una gamma di ritmi diversi, il che significa che prevedeva gli accenti, benché la sua preferenza paresse decisamente andare ai ritmi ballabili piuttosto che a quelli più veloci.¹⁵ Ma gli uccelli sono l'eccezione. Le scimmie sono in grado di imparare a riprodurre un singolo intervallo delimitato da due segnali sonori, ma hanno difficoltà a svolgere un semplice compito di sincronizzazione.

Una ricerca ha evidenziato che, anche dopo un anno di addestramento, le scimmie rhesus non riescono a premere un bottone in sincronia con segnali sonori proposti in maniera periodica, anche se sono capaci di dare con regolarità un colpo sul bottone dopo ogni occorrenza del segnale.^{[16](#)}

Perché il compito apparentemente banale di tenere il tempo è così difficile per i nostri colleghi primati ma non per alcuni uccelli? Una possibile risposta va sotto il nome di *ipotesi dell'apprendimento vocale*. La maggioranza dei mammiferi – comprese le scimmie, i cani e i gatti – comunica per mezzo di gridi, ululati, ringhi, latrati

o miagolii, ma tali comportamenti sono innati e riflettono un insieme semplicissimo e limitatissimo di “parole”: un cane, ad esempio, non ha bisogno di imparare che un ringhio non vuol dire «Benvenuto, avvicinati prego». Sono relativamente pochi gli animali che imparano a produrre vocalizzi grazie all’esperienza e alle interazioni sociali. Oltre agli umani, le specie capaci di apprendimento vocale includono alcuni uccelli, le balene e gli elefanti. I pappagalli sono l’esempio più evidente, dal momento che possono imparare a riprodurre i suoni emessi dagli altri uccelli o imitare un limitato repertorio di parole appartenente al lessico dei pirati.

L'apprendimento vocale richiede che il cervello ascolti i suoni e poi escogiti il modo per riprodurli servendosi delle corde vocali e dei muscoli orali. Un compito di questo tipo comporta chiaramente una cooperazione significativa fra i centri uditivo e motorio del cervello. Analogamente, la capacità di muoversi in sincronia con uno stimolo uditivo periodico comporta una stretta cooperazione fra i sistemi uditivo e motorio. È stato suggerito che i medesimi circuiti cerebrali che permettono agli animali di imparare la comunicazione vocale siano alla base dell'azione apparentemente molto più semplice consistente nel seguire il ritmo

di una canzone.^{[17](#)}

Il linguaggio e la musica sono attività le quali richiedono che il cervello si crei incessantemente delle aspettative su ciò che sta per avvenire. In particolare, è connaturato alla musica indurre l'ascoltatore ad aspettarsi una determinata nota in un determinato momento; che tale aspettativa sia soddisfatta o meno dipende dall'intento del compositore.^{[18](#)} Non è dunque sorprendente che la capacità di seguire un ritmo sia un requisito minimo per poter apprezzare la musica, dato che uno dei metodi più semplici per valutare la capacità di un animale di prevedere e attendersi uno stimolo consiste nel

misurare la sua abilità nel picchiettare in
sincronia con uno stimolo periodico.

Uccelli canori

Gli uccelli non si limitano a ballare; alcuni sanno anche cantare. Perlomeno, *n o i* lo chiamiamo cantare; loro comunicano gli uni con gli altri. Fra l'apprendimento del canto da parte degli uccelli e l'apprendimento del linguaggio da parte degli esseri umani esistono numerose analogie. Tali analogie hanno fatto sì che gli uccelli canori rappresentino una specie importante ai fini dello studio dell'apprendimento, della comunicazione, del linguaggio e dell'elaborazione temporale.¹⁹ Nel corso del corteggiamento i maschi dei diamanti mandarini producono canti elaborati. I giovani maschi imparano

questi canti dai maschi adulti, o anche semplicemente ascoltando una registrazione sonora del canto di un altro maschio. In modo molto simile a ciò che avviene per il linguaggio umano, l'apprendimento vocale deve avvenire all'interno di una ben precisa finestra evolutiva. Se ciò non accade, gli uccelli canori non impareranno mai a produrre un canto adulto normale: un maschio che non ha mai udito il canto di un altro maschio canterà comunque, ma la qualità del suo canto avrà scarse probabilità di sedurre una femmina.

Come nel linguaggio e nella musica, all'interno del canto di un uccello esiste una gerarchia temporale di elementi. All'interno di un canto le note si

combinano a formare le sillabe, e una sequenza di sillabe compone le frasi. Una data sillaba può durare fino ad alcune centinaia di millisecondi, le pause fra le sillabe durano in genere meno di 100 ms e un canto intero può proseguire per diversi secondi. I cervelli dei diamanti mandarini maschi sono assai diversi da quelli delle femmine della medesima specie: i maschi possiedono infatti un certo numero di aree cerebrali il cui ruolo è cruciale per l'apprendimento e la produzione del canto (le femmine non cantano). Una di esse va sotto il nome di HVC (non chiedete di che cosa è la sigla: non sta per alcunché). Tale nucleo

governa almeno in parte l'organizzazione temporale del canto di un diamante mandarino. I neuroni dell'HVC si attivano in momenti specifici del canto: per esempio, è possibile che un neurone si attivi 100 millisecondi dopo l'inizio di una frase e che un altro lo faccia dopo 500 millisecondi.²⁰ Possiamo immaginare questi neuroni come elementi di una catena nella quale il neurone *A* attiva *B*, che attiva *C*... (Fig. 5.2). Il risultato è che dopo l'attivazione di *A* si genera un effetto domino $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ (in realtà è meglio concepire ciascun anello della catena come un gruppo di neuroni anziché come un unico neurone). È un po' come

utilizzare una fila di tessere del domino a mo' di cronometro: se le tessere sono disposte in sequenza alla medesima distanza, e ciascuna tessera impiega 100 millisecondi a cadere, sappiamo che quando la quinta tessera cadrà saranno trascorsi circa 500 millesimi di secondo, e che quando cadrà la decima sarà passato 1 secondo...

Analogamente, come analizzeremo in maggior dettaglio nel prossimo capitolo, è ipotizzabile che in alcuni casi il cervello misuri il tempo individuando quali neuroni di una catena sono attivi in un dato momento. I neuroni dell'HVC sembrano appunto servirsi di un meccanismo simile per controllare il ritmo delle note del canto di un uccello.

Nondimeno una delle sfide tipiche delle neuroscienze consiste nel non confondere correlazione e causazione: il fatto che i neuroni dell'HVC appaiano regolare il canto non significa che ciò accada davvero. Nel tentativo di dirimere la questione i neuroscienziati Michael Long e Michale Fee, allora entrambi al MIT, arguirono che, se i neuroni dell'HVC sono all'origine del ritmo del canto, allora rallentare l'attività di tali neuroni dovrebbe fare sì che gli uccelli cantino al rallentatore.^{[21](#)}

Rallentare l'attività di un gruppo di neuroni è un compito difficile, ma è realizzabile se si manipola la temperatura locale dell'area cerebrale

di interesse. Raffreddando un tessuto biologico generalmente si rallenta il suo metabolismo e il suo ritmo di attività. Ciò vale anche per i neuroni. Per esempio, negli animali eterotermi («a sangue freddo») la velocità con cui un potenziale d'azione viaggia lungo un assone e perfino la durata stessa del potenziale d'azione possono dipendere dalla temperatura esterna (è questa una delle ragioni per cui gli animali endotermici in genere hanno riflessi più rapidi rispetto agli animali eterotermici). Per abbassare la temperatura dell'HVC Long e Fee usarono un minuscolo elemento raffreddante inseribile nel cervello degli uccelli.

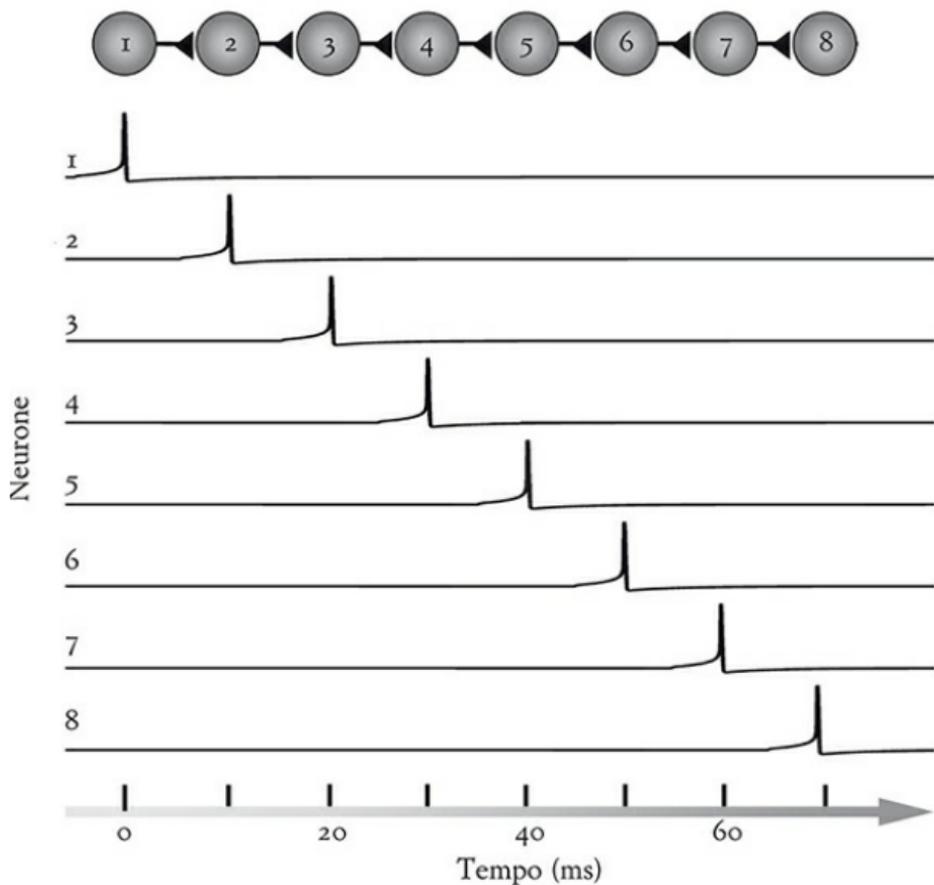


Figura 5.2

Catena ad attivazione sequenziale (*synfire chain*). In un modello di catena *synfire* i singoli neuroni (o gruppi di neuroni) sono collegati in modalità di preazione (*feed-forward*). L'attività – ossia i potenziali d'azione rappresentati dai «picchi» di voltaggio – si propaga attraverso la rete in maniera

molto simile a ciò che avviene con le tessere del domino. Il neurone attivo in un dato momento racchiude in sé l'indicazione del tempo trascorso dall'attivazione del primo neurone della catena.

Ciò permise loro di diminuire di cinque o sei gradi centigradi rispetto alla temperatura corporea la temperatura dell'HVC degli uccelli maschi impegnati a cantare (i maschi sono in genere indotti a cantare ponendo una femmina in una gabbia vicina). I risultati furono chiari: raffreddare l'HVC rallentava il ritmo del canto. È degno di nota che questo rallentamento fosse uniforme per tutta la durata del canto; in altre parole le note, le sillabe, le pause e l'intera frase risultavano dilatate nella medesima proporzione, fino al 40 per cento. In un

importante esperimento di controllo i ricercatori raffreddarono un nucleo motorio rilevante per la produzione del canto, un'area stimolata dall'HVC. Ciò non influenzò in maniera significativa il ritmo del canto, indicando che il rallentamento di quest'ultimo si ottiene rallentando gli schemi di attività (la dinamica neurale) *interni* ai neuroni dell'HVC, e che in questo frangente l'area motoria risulta sostanzialmente subalterna all'HVC.

Benché siano molte le domande relative alla regolazione temporale del canto degli uccelli ancora prive di risposta, questi esperimenti forniscono una prova del fatto che un singolo nucleo interno al cervello può contribuire, se

non presiedere, all'organizzazione temporale di un comportamento complesso.

La neuroanatomia del tempo

Gli studi elettrofisiologici sugli animali e quelli condotti mediante le tecniche di neuroimmagine sugli esseri umani non forniscono prove convergenti a favore della tesi secondo cui nel cervello esisterebbe un circuito primario che presiede alla misurazione del tempo per intervalli compresi fra le centinaia di millisecondi e alcuni secondi. Anzi, è sempre più difficile trovare aree del cervello alle quali non sia stato attribuito qualche tipo di elaborazione temporale.²² È evidente che qualunque versione forte dell'ipotesi del circuito primario è errata, il che non vuol dire che non

esistano aree specifiche del cervello preposte a qualche genere di elaborazione temporale. Negli uccelli l'HVC sembra in effetti un nucleo cruciale per dare il tempo al canto. Come vedremo nel prossimo capitolo, nei mammiferi il cervelletto ha un ruolo importante in alcune forme di tempismo esecutivo. Inoltre le ricerche hanno sistematicamente rilevato che alcune aree del cervello sono coinvolte nella discriminazione degli intervalli. Tali aree comprendono i gangli basali (un gruppo di nuclei cerebrali situati sotto la corteccia) e l'area motoria supplementare (un'area, adiacente alla corteccia motoria, che contribuisce al

movimento).²³ Tuttavia è troppo presto per dire se queste aree misurino effettivamente il tempo o si limitino invece a mostrarlo, cioè se siano il cristallo di quarzo o viceversa il display digitale di un orologio da polso. Per giunta tali studi non svelano granché circa *il modo* in cui i vari circuiti cerebrali misurano il tempo, ossia circa i meccanismi neurali alla base di tale attività.

Le ricerche teoriche e sperimentali svolte dal mio e da un certo numero di altri laboratori suggeriscono che, sebbene all'interno del cervello vi siano circuiti specifici preposti a determinati tipi di misurazione temporale, la

maggior parte dei circuiti neurali sono, ove necessario, intrinsecamente in grado di misurare il tempo. A seconda delle caratteristiche del compito di misurazione (ad esempio, sensoriale o motorio, riguardante intervalli o schemi, relativo a durate inferiori oppure superiori al secondo) è possibile che il lavoro sia svolto in prevalenza da un circuito neurale piuttosto che da un altro. Così è possibile che spetti in parte ai circuiti uditivi distinguere una semiminima da una cromia; che i circuiti visivi contribuiscano alla decifrazione di un messaggio in codice Morse realizzato visivamente con punti e linee; che i circuiti motori presiedano all'invio di un sos in codice Morse sonoro; e che i

gangli basali concorrano alla nostra capacità di prevedere quando cambierà il colore di un semaforo.

Questa concezione della misurazione del tempo come attività generale che la maggior parte dei circuiti neurali – in misura più o meno ampia – sono in grado di eseguire ha indotto il mio laboratorio a domandarsi: *può una porzione isolata della corteccia, coltivata in vitro, misurare il tempo?*

Così come è possibile coltivare in vitro cellule ematiche o tessuti cardiaci o epatici, da molto tempo i neuroscienziati sono in grado di coltivare porzioni di corteccia cerebrale ricavate dai ratti o dai topi. Questi

circuiti corticali in vitro possono contenere decine di migliaia di neuroni ed essere tenuti in vita per settimane o per mesi. Normalmente tali circuiti sono collocati in un incubatore, senza alcuna possibilità di interazione con il mondo esterno. I membri del mio laboratorio Hope Johnson e Anu Goel si chiesero che cosa sarebbe accaduto esponendo questi circuiti a qualche tipo di schema temporale. Si sarebbero modificati o adattati in qualche modo? Sarebbero riusciti, per così dire, a «imparare» un intervallo specifico? In una serie di esperimenti furono elettrostimate per alcune ore, a intervalli di 100, 250 o 500 ms, sezioni della corteccia uditiva

dei ratti.²⁴ Di norma il cervello riceve informazioni attraverso i propri organi sensoriali, ma i neuroni che si trovano in coltura in una capsula non hanno alcun modo per ricevere segnali dal mondo esterno. Per fornire ai circuiti in vitro una sorta di esperienza sensoriale, nell'esperimento furono utilizzati elettrodi metallici che fornivano ai tessuti una scarica di breve durata, causando l'attivazione di una piccola percentuale dei neuroni. A intervalli di 100, 250 o 500 ms Anu Goel applicò un secondo stimolo, questa volta sotto forma di pulsazione luminosa, che a sua volta provocava l'attivazione di un sottoinsieme di neuroni. Di norma,

naturalmente, i neuroni non reagiscono alla luce (ad eccezione dei fotorecettori presenti nell'occhio), poiché sono privi dei pigmenti che la rilevano.²⁵ Tuttavia, per mezzo dei cosiddetti metodi optogenetici, è possibile indurre i neuroni in vitro ad attivarsi in risposta alla luce introducendo in essi un gene esogeno che codifica per una proteina fotosensibile. In tal modo questi circuiti corticali avevano un limitatissimo contatto con il mondo esterno: tutto ciò di cui avevano esperienza era uno dei tre diversi intervalli temporali. La domanda era: questa esperienza influenza in qualche modo il comportamento di tali circuiti? Le

sezioni non addestrate spesso reagiscono a un impulso elettrico di breve durata con un'impennata di attività sistemica che dura fino a qualche centinaio di millisecondi. Ciò avviene perché i neuroni direttamente attivati dalla scarica attivano altri neuroni, che a loro volta potrebbero attivarne altri ancora: l'attività «si riverbera» per alcune centinaia di millisecondi per poi spegnersi. Tale attività è un segno distintivo della dinamica interna della rete. A seconda dell'intervallo adoperato per addestrare le sezioni, la dinamica interna della rete manifestò segni distintivi differenti. Nel caso di un intervallo breve l'attività era di breve durata; quando le sezioni erano

addestrate a intervalli di 250 o di 500 ms, la durata media dell'attività di rete aumentava progressivamente. Pertanto, non solo la dinamica interna delle sezioni veniva alterata dalla loro esperienza, ma il profilo temporale di questa dinamica si adattava all'intervallo oggetto dell'addestramento. Una ricerca svolta indipendentemente nel laboratorio di Marshall Shuler alla John Hopkins University constatò l'esistenza di una forma di apprendimento di intervalli anche in sezioni corticali in vitro della corteccia visiva.²⁶ Un'interpretazione di questi risultati consiste nell'affermare che persino i circuiti corticali in vitro

sono, in un certo senso, capaci di imparare a misurare il tempo.

Le ricerche citate offrono un forte sostegno alla tesi secondo cui la misurazione del tempo nell'ambito delle centinaia di millisecondi dovrebbe essere considerata non come un'attività effettuata da circuiti specializzati, bensì come una proprietà intrinseca dei circuiti neurali.

Spesso ci si domanda se esistano disturbi neurologici che causano la perdita della capacità di misurare il tempo. La risposta a questo interrogativo dipende dalla scala temporale a cui ci riferiamo. Abbiamo visto in precedenza che il paziente amnesico Clive Wearing ha certamente perso la cognizione dei

minuti, il che spiega perché appaia intrappolato in una sorta di eterno ritorno che lo porta incessantemente a credere di essersi appena svegliato. La cosa corrisponde alla logica: anche nel caso in cui avessimo un orologio funzionante appeso alla parete, se non riuscissimo a ricordare quando il nostro compito è iniziato non saremmo in grado di capire quando è trascorsa un'ora. Dal momento che la capacità di Wearing di suonare la musica, di comprendere il linguaggio e di parlare è intatta, la sua capacità di misurare il tempo nell'ordine delle centinaia di millisecondi a sua volta risulta evidentemente intatta. E

presumibilmente, al pari del famoso paziente amnesico H. M., egli è in grado di riprodurre con precisione intervalli di qualche secondo.²⁷ In pazienti come Wearing e H. M. la capacità di formare nuovi ricordi a lungo termine (più specificamente, ricordi relativi a circostanze ed episodi della propria vita) risulta gravemente danneggiata. Lo studio di questo genere di deficit ha permesso di compiere progressi fondamentali nella conoscenza del modo in cui il cervello immagazzina i ricordi. Perciò è naturale chiedersi se vi siano disturbi che cancellano la capacità di misurare il tempo per intervalli di circa un secondo. La risposta è no. Non si

conoscono affezioni neurologiche che distruggano la capacità di cogliere il ritmo della musica e di riprodurre intervalli dell'ordine dei secondi e di imparare a battere le palpebre al momento giusto in risposta a un segnale sonoro. Né dovremmo aspettarci che esistano, dal momento che problemi temporali differenti sono risolti da circuiti cerebrali differenti.

Gli oggetti sono entità fisiche che possono essere viste o toccate, ma di per sé il cervello non vede né tocca mai nulla direttamente. Tutta la sua conoscenza del mondo esterno gli giunge attraverso schemi di potenziali di azione creati presso uno dei cinque organi di

senso. Da tali schemi il cervello impara a individuare entità fisiche reali, ad esempio le spade laser o le papaie. Dal punto di vista visivo, simili oggetti sono in un certo senso indipendenti dal tempo: possono essere identificati attraverso un'istantanea. Ma molto di ciò che il cervello individua nel mondo esterno è intrinsecamente temporale; un cenno della mano, un'onda in uno stagno, la lettera ... (*s* in codice Morse), un motivetto orecchiabile, il volo del pipistrello, nonché il suono delle parole *volo* e *pipistrello*. Questi sono tutti «oggetti» temporali. Per percepire, e rappresentare, questo tipo di eventi occorre che il cervello sia ricettivo nei confronti dell'ordinamento e del flusso

temporali.

Il tempo di inizio della sonorità di un fonema, la durata di una nota musicale o la differenza fra un punto e una linea del codice Morse richiedono una misurazione fine del tempo: sono gli alberi nella foresta. Una frase di senso compiuto, pronunciata a voce o espressa in codice Morse, oppure una melodia sono invece il panorama più ampio, osservabile solo su una scala temporale che va dalle decine di millisecondi ad alcuni secondi. Al di fuori di questa finestra il linguaggio e la musica non esistono. Se la rallentate o la accelerate troppo, la musica cessa di essere musica. Se parlate troppo velocemente i

fonemi si confondono fra di loro; se rallentate eccessivamente il discorso, i fonemi non sono più riconoscibili e l'ascoltatore comincia a perdere traccia sia di questi ultimi sia delle parole che li precedono. L'intervallo che va da alcuni millisecondi al secondo è l'aurea zona di mezzo dell'elaborazione temporale: la zona in cui siamo in grado di attribuire un senso sia alla foresta che agli alberi.

Senza la capacità di analizzare schemi temporali complessi non saremmo in grado di esercitare due facoltà caratterizzanti della specie umana: il linguaggio e la musica. Ma in che modo il cervello risolve i complessi problemi di elaborazione temporale

connaturati al linguaggio e alla musica?
In che modo misura la durata di una
sillaba o determina il ritmo di una
canzone?

6:00

Tempo, dinamica neurale e caos

Che cosa è un orologio?

La spontanea sensazione soggettiva del flusso del tempo ci pone in grado di ordinare le nostre impressioni, di giudicare cioè che un evento si verifica prima ed un altro dopo. Ma per giudicare se l'intervallo di tempo fra due eventi è, ad esempio, di dieci secondi, occorre un orologio. Mediante l'impiego di un orologio il concetto di tempo diviene oggettivo.

Albert Einstein e Leopold Infeld¹

Gli orologi artificiali, cioè fabbricati

dall'uomo, si basano su un principio di imbarazzante semplicità: contare il numero di cicli di un oscillatore. La complessità dell'oscillatore varia immensamente – un pendolo, un cristallo di quarzo o la radiazione elettromagnetica con le sue «vibrazioni» – ma alla fine tutti gli orologi artificiali non fanno che contare il tic-tac di qualche processo periodico. Visto l'incredibile successo ottenuto da questa strategia è forte la tentazione di presumere che, per misurare il tempo, il cervello si affidi a principi analoghi.

Forse troppo forte.

L'ipotesi più influente circa il modo in cui il cervello misura il tempo per intervalli che spaziano dai millisecondi

ai secondi è detta *modello dell'orologio interno* e fu originariamente delineata nei primi anni sessanta del secolo scorso.² Come il nome suggerisce, tale modello postula che nel cervello sia all'opera un meccanismo simile a quello degli orologi artificiali: un neurone o un gruppo di neuroni ticchetterebbe con una certa frequenza fissa mentre un altro gruppo di neuroni conterebbe il numero di questi ticchettii. Sembra un'ipotesi ragionevole, specialmente quando si viene a sapere che molti neuroni effettivamente oscillano, vale a dire sono in grado di attivarsi ripetutamente secondo un ritmo piuttosto regolare. In effetti le onde cerebrali, la respirazione,

il camminare e il battito cardiaco sono tutti esempi di fenomeni biologici altamente ritmici, basati su oscillatori biologici i cui periodi variano dalle decine di millisecondi a qualche secondo.

Tuttavia gli orologi artificiali non richiedono soltanto un buon oscillatore; richiedono anche un meccanismo per contare ciascuna oscillazione, una funzione che negli orologi meccanici è svolta dagli ingranaggi e in quelli al quarzo dai circuiti digitali. E qui sorge un problema, perché i neuroni possono sì essere abili oscillatori, ma contare non è il loro forte.

La misura del tempo sovra- e infraperiodica

Forse state pensando: «Un momento, abbiamo visto che gli orologi circadiani si basano su un oscillatore biologico, un oscillatore che dipende da un ciclo di feedback autoregolativo di trascrizione/traduzione». Inoltre, come abbiamo appena osservato, il ritmo del respiro, il ritmo del battito cardiaco e quello dei passi dipendono effettivamente da oscillatori biologici. Pertanto, per misurare il tempo, il corpo utilizza davvero lo stesso meccanismo di funzionamento degli orologi artificiali! Questo ragionamento è corretto solo in parte, poiché esiste

un'importante differenza fra gli esempi citati e gli orologi costruiti dall'uomo. Gli intervalli misurati nei nostri esempi biologici sono *minori o uguali* al periodo dell'oscillatore, mentre nel caso degli orologi artificiali vale il contrario: gli orologi artificiali possono infatti misurare il tempo solo per intervalli *maggiori* del periodo della loro base di tempo. Gli oscillatori biologici sono generalmente impiegati per misurare eventi di durata inferiore a quella del loro periodo (*misurazione infraperiodica*) laddove gli orologi artificiali misurano il tempo trascorso per durate superiori al loro periodo (*misurazione sovraperiodica*).

Il dispositivo molecolare

comprendente gli orologi circadiani discussi nel [Capitolo 3](#) ha un periodo di circa 24 ore. La concentrazione delle proteine circadiane, come Period, informa sulla fase in corso all'interno di questo ciclo di 24 ore: ad esempio, indica se è mattina, pomeriggio o notte. Ma l'orologio circadiano che si trova nel nostro nucleo soprachiasmatico non ha alcuna idea di quanti giorni siano passati! Ogni nuovo giorno determina un azzeramento completo: come in un pendolo solitario scollegato da qualunque ingranaggio, manca qualsiasi registrazione o ricordo del numero di cicli che si sono succeduti. Analogamente, gli oscillatori neurali

alla base della respirazione provvedono a farci respirare più o meno con la stessa frequenza, diciamo 0,25 Hertz (un periodo di 4 secondi). Ciascun ciclo respiratorio richiede un certo numero di eventi motori opportunamente disposti nel tempo, fra cui la gestione coordinata dell'inspirazione e dell'espiazione. Possiamo perciò dire che i centri neurali preposti al controllo della respirazione misurano il tempo su una scala inferiore ai 4 secondi, ma, anche in questo caso, ciascun nuovo periodo comporta in pratica un azzeramento completo.³ I circuiti neurali che controllano la respirazione non sanno se hanno generato mille, un milione o un milione e

uno cicli respiratori.

Esistono reti di neuroni che integrano le informazioni nel corso del tempo («contano»), ma non possiedono la precisione numerica e l'ampiezza di memoria che hanno gli ingranaggi di un pendolo o i circuiti digitali che contano le oscillazioni di un orologio al quarzo o di un orologio atomico. Esseri umani ben allenati riescono a distinguere un intervallo di 100 ms da uno di 105 ms. Ma, affinché sia possibile rilevare questa differenza di 5 ms per mezzo di un meccanismo sovrapperiodico, la base di tempo dovrebbe oscillare a 200 Hz e il circuito accumulatore dovrebbe discriminare fra 20 e 21 ticchettii, requisiti difficili da soddisfare date le

proprietà e il livello di precisione temporali dei neuroni. In linea con questa osservazione, il sostegno sperimentale al modello dell'orologio interno risulta scarso.

La carenza di sostegno empirico a favore del modello dell'orologio interno non significa necessariamente che gli oscillatori cerebrali non siano coinvolti nella misurazione sovraperiodica del tempo. È stato ad esempio ipotizzato che alcune forme di misura del tempo si basino su un insieme di oscillatori neurali ciascuno dei quali dotato di una frequenza differente. Quando questa serie di oscillatori viene messa in movimento, le diverse sottopopolazioni

di neuroni producono degli *accenti*, cioè dei momenti nei quali alcuni degli oscillatori sono temporaneamente allineati, seguiti da momenti in cui la maggior parte degli oscillatori risulta invece sfasata. I modelli computazionali hanno messo in evidenza che questa serie di oscillatori neurali potrebbe essere utilizzata per distinguere, grazie all'individuazione di tali accenti, intervalli di durata inferiore al periodo di ciascuno degli oscillatori stessi.⁴

Abbiamo visto, tuttavia, che la misurazione del tempo su una scala compresa tra le centinaia di millisecondi e alcuni secondi riveste un ruolo del tutto speciale. Qui il cervello non si

limita a calcolare diligentemente l'intervallo che separa gli eventi, ma deve tenere conto del contesto, delle gerarchie temporali, degli schemi che si configurano nel tempo. All'interno di questa cruciale zona di mezzo siamo in grado di ricavare sia la durata degli eventi e degli intervalli che li separano, sia la struttura temporale complessiva delle sequenze di fonemi, delle note musicali e dei punti e delle linee del codice Morse. Per spiegare la misurazione del tempo sulla scala dei millisecondi e dei secondi appare perciò opportuno guardare al di là dei tradizionali meccanismi basati su un oscillatore.

Onde concentriche

Esaminiamo gli schemi ondulatori creati da due gocce di pioggia che cadono in uno stagno ([Fig. 6.1](#)). Quale delle due gocce è caduta prima? Uno degli obiettivi di questo capitolo è dimostrare – come Einstein e il suo collega Leopold Infeld ci ricordano nell'epigrafe – che, in linea di principio, per misurare il tempo si può impiegare qualunque fenomeno fisico riproducibile.

Se supponiamo che le due gocce di pioggia colpiscano la superficie dell'acqua più o meno con la stessa quantità di moto, ne deriva che esse genereranno due onde concentriche

espandentisi dotate di caratteristiche analoghe. Tali onde sono un esempio di *schema spaziotemporale*, cioè di uno schema spaziale che varia nel tempo. Una fotografia dello schema spaziale presa in un istante qualsiasi non solo rende evidente quale goccia è caduta prima, ma, con l'aiuto di un po' di aritmetica, ci consente anche di stimare l'intervallo fra le due gocce di pioggia.

Consideriamo un altro semplice esempio di come un sistema fisico dinamico potrebbe essere usato per misurare il tempo. Immaginiamo una bambina che scende lungo uno scivolo d'acqua: se parte sempre dallo stesso punto completerà ogni discesa all'incirca nella stessa quantità di

tempo. Potremmo allora segnare sullo scivolo delle linee corrispondenti a intervalli di un secondo; queste linee sarebbero più vicine le une alle altre in alto e più distanziate in basso, poiché la bambina scivolando acquista velocità. Così, via via che la bambina raggiunge ciascuna linea, potremmo dichiarare ad alta voce quanto tempo è passato da quando è partita.

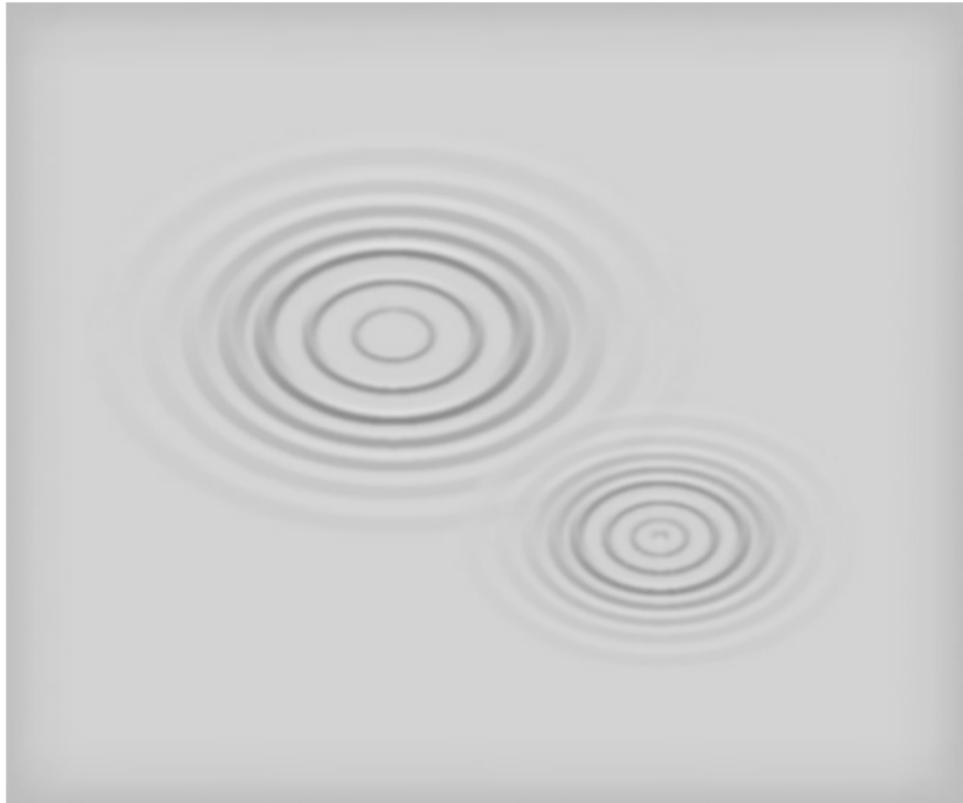


Figura 6.1

Onde concentriche. Il tempo è per natura codificato nello stato dei sistemi dinamici. Qui è chiaro quale goccia è caduta prima, e sarebbe possibile stimare l'intervallo fra le due gocce di pioggia.

Il nostro cronometro costituito dalla

bimba sullo scivolo è azionato dalla gravità, proprio come un orologio ad acqua o una clessidra. Cronometri simili potrebbero non sembrare particolarmente precisi, ma si consideri che i tempi complessivi fatti registrare dai primi otto classificati nella discesa libera maschile delle Olimpiadi invernali del 2014 erano racchiusi nello spazio di mezzo secondo. Variavano infatti da 2:06:23 a 2:06:75: un'accuratezza inferiore allo 0,4 per cento, migliore di quella di qualsiasi orologio inventato prima degli orologi a pendolo di Huygens.

Plasticità sinaptica a breve termine

La maggior parte dei sistemi fisici – uno sciatore durante una discesa libera, una palla che rotola giù da un piano inclinato, le reazioni biochimiche all'interno di una cellula o le onde in uno stagno – sono processi che si svolgono nel tempo secondo modalità determinate dalle leggi della fisica; in altre parole, sono sistemi dinamici che in linea di principio possono essere impiegati per misurare il tempo. Il cervello è il sistema dinamico più complesso a noi noto nell'universo, per cui appare naturale che, per misurare il tempo, il cervello possa ipoteticamente sfruttare la propria dinamica intrinseca.

Ogni volta che si attiva, un neurone subisce in effetti una serie di cambiamenti riproducibili, proprio come accade allo stagno in seguito alla caduta delle gocce di pioggia.

Nel [Capitolo 2](#) abbiamo visto che i neuroni sono collegati dalle sinapsi, e che la forza di una sinapsi determina l'influenza che il neurone presinaptico esercita sul neurone postsinaptico. Inoltre la forza di queste sinapsi può variare – una sinapsi debole può diventare forte – e il meccanismo della plasticità sinaptica è uno dei mezzi coi quali il cervello apprende e immagazzina informazioni.

Per semplificarci la vita i neuroscienziati spesso danno a intendere

che, in assenza di apprendimento, la forza sinaptica rimane più o meno costante. Invece la maggior parte delle sinapsi si rafforza o si indebolisce temporaneamente ogni volta che viene utilizzata, cioè dopo ogni picco presinaptico. Questa variazione della forza sinaptica dipendente dall'uso è definita *plasticità sinaptica a breve termine*, e si verifica all'interno di un intervallo compreso fra le decine di millisecondi e qualche secondo.⁵

Alcune sinapsi corticali manifestano una facilitazione a breve termine: se, ad esempio, il neurone presinaptico genera due picchi consecutivi intervallati da 100 millisecondi, il secondo picco

produce una variazione di voltaggio del neurone postsinaptico maggiore rispetto a quella prodotta dal primo picco ([Fig. 6.2](#)); in altre parole, il segnale inviato dal neurone presinaptico a quello postsinaptico diventa più «forte e chiaro». La maggior parte delle sinapsi corticali manifesta però una depressione a breve termine, vale a dire che, fra due picchi intervallati da 100 ms, il secondo genera nel neurone postsinaptico una variazione di voltaggio minore rispetto al primo. In ogni caso l'ampiezza della variazione di voltaggio dipende dall'intervallo che intercorre fra i due picchi: in genere l'effetto è massimo per intervalli inferiori ai 100 ms e si esaurisce dopo alcune centinaia di

millisecondi. Il significato di tutto ciò è che, come in uno stagno il diametro dell'onda concentrica più esterna contiene informazioni sulla quantità di tempo che è trascorsa dal momento in cui la goccia di pioggia ha colpito la superficie dell'acqua, la forza di una sinapsi contiene in ogni dato istante informazioni sul tempo trascorso dal momento in cui la sinapsi è stata utilizzata l'ultima volta.

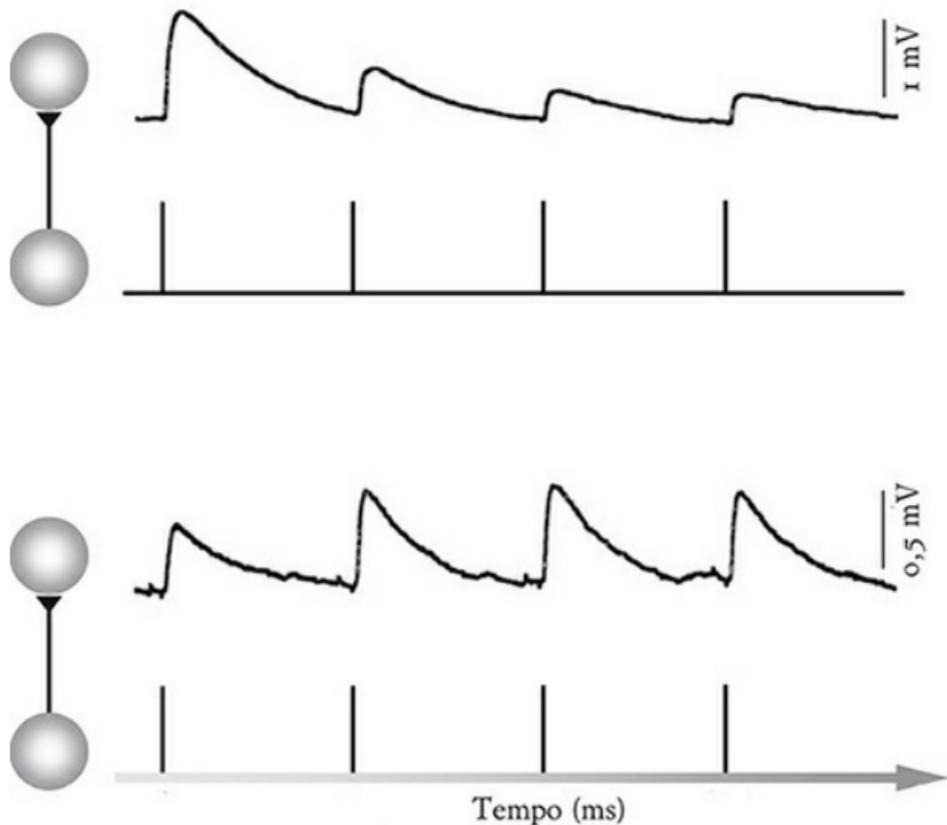


Figura 6.2

Plasticità sinaptica a breve termine. Sulla scala dei millesimi di secondo la forza di una sinapsi può andare incontro a una depressione a breve termine (sopra) oppure a una facilitazione sinaptica a breve termine (sotto). (Grafici tratti da Reyes e Sakmann

Ho avanzato l'ipotesi che la plasticità sinaptica a breve termine e altre proprietà neuronali dipendenti dal tempo contribuiscano alla capacità del cervello di misurare intervalli dell'ordine delle centinaia di millisecondi.⁶ Si consideri il circuito neurale più semplice possibile: due neuroni collegati da un'unica sinapsi ([Fig. 6.3](#)). Supponiamo che il neurone presinaptico generi due picchi separati da un intervallo di 50, 100 oppure 200 millisecondi. Possiamo considerare questi intervalli come stimoli temporali: in effetti, nel caso di alcuni animali, l'informazione viene veicolata da pause

delimitate dall'emissione di «clic» (ossia brevi esplosioni sonore). Per ciascuno di questi tre intervalli la variazione di voltaggio prodotta dal primo picco sarà la medesima, e supponiamo che la «forza» di questo picco sia di 1 millivolt. A causa della plasticità sinaptica a breve termine la forza della sinapsi sarà differente al momento del secondo picco. Nel caso specifico, la variazione di voltaggio prodotta dal secondo picco associato all'intervallo di 50 ms potrebbe essere di 1,5 millivolt, mentre la forza del secondo picco nel caso degli intervalli di 100 e 200 ms potrebbe essere, rispettivamente, pari a 1,25 e a 1,1 millivolt. Se costruiamo il nostro

circuito neurale in modo tale che il neurone postsinaptico si attivi solo quando riceve un impulso di almeno 1,5 millivolt, ecco che avremmo realizzato una specie di cronometro: un neurone che si attiva solo quando riceve due impulsi separati da 50 millisecondi.

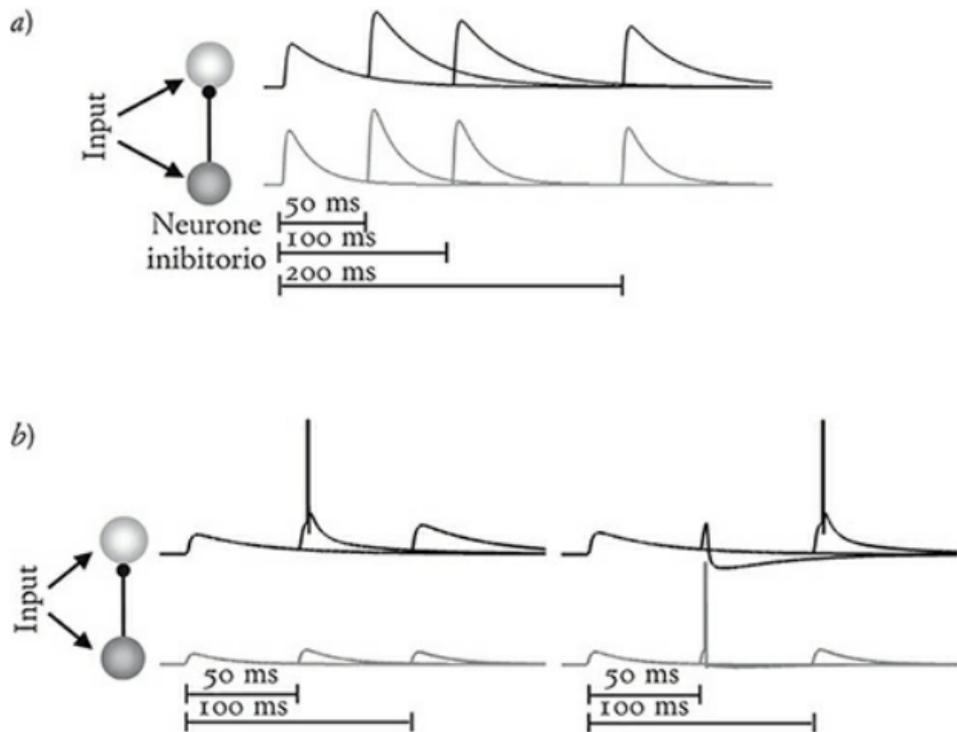


Figura 6.3

Intervallo-selettività basata sulla plasticità sinaptica a breve termine.

a) In questa simulazione di un semplice circuito neurale un singolo neurone di input entra in contatto con un neurone eccitatorio (*in alto*) e con un neurone inibitorio (*in basso*). I diagrammi mostrano la variazione di voltaggio in risposta a tre diversi intervalli: il neurone di input attiva due

picchi, rispettivamente separati da 50, 100 e 200 ms. Le sinapsi che connettono il neurone di input a ciascuno dei due neuroni di output manifestano una facilitazione a breve termine: per esempio, l'ampiezza della variazione di voltaggio indotta dal secondo picco nel caso di uno stimolo da 50 ms è maggiore di quella causata dal primo picco.

b) A seconda della forza delle sinapsi che collegano il neurone di input ai neuroni eccitatorio e inibitorio, il neurone eccitatorio è in grado di reagire selettivamente a un intervallo di 50 (*a sinistra*) o di 100 (*a destra*) ms; pertanto il neurone eccitatorio di questo semplice circuito è in grado, in un certo senso, di misurare il tempo.

I modelli neurocomputazionali hanno dimostrato che semplici circuiti composti da neuroni eccitatori e inibitori dotati di plasticità sinaptica a breve termine sono in grado di reagire selettivamente a una gamma di intervalli

temporali diversi: ad esempio, a un intervallo di 100 ms, ma non a intervalli di 50 o di 200 ms.⁷ Simili neuroni intervallo-selettivi sarebbero potenzialmente impiegabili per rilevare il tempo di inizio della sonorità dei fonemi, gli intervalli fra i simboli del codice Morse o gli intervalli fra le note musicali.

Le ricerche hanno individuato nel cervello di molti animali (dai grilli ai pesci elettrici fino ai ratti) neuroni che reagiscono selettivamente a intervalli differenti. L'origine di questa specificità temporale non è ancora stata pienamente acclarata, ma alcuni studi indicano che la plasticità sinaptica a breve termine vi

giochi almeno in parte un ruolo.8

Reti stato-dipendenti

Il nostro ipersemplicato circuito a due neuroni è un po' un insulto ai circuiti cerebrali reali. Un millimetro cubo di corteccia può contenere infatti centomila neuroni e centinaia di milioni di sinapsi.⁹ Per tentare di cogliere il modo nel quale i circuiti corticali processano schemi spaziali e temporali complessi sono state proposte teorie di portata più generale. A questo proposito e i miei colleghi, e successivamente il matematico austriaco Wolfgang Maass e i suoi colleghi, abbiamo presentato un insieme di modelli denominati *reti stato-dipendenti*.¹⁰ Per comprendere questa teoria è necessario chiarire che

cosa si intende per *stato* di un circuito corticale.

In fisica possiamo concepire lo stato di un sistema come il valore delle variabili che forniscono le informazioni pertinenti circa l'attuale «configurazione» (stato) del sistema. Lo stato di un gruppo di palle su un tavolo da biliardo può essere definito specificando la posizione e la quantità di moto (la massa per la velocità) di ciascuna palla. In linea di principio sapere qual è lo stato delle palle da biliardo in un dato istante fornisce tutte le informazioni necessarie per dedurre non solo ciò che accadrà, ma anche ciò che è accaduto: conoscendo lo stato nell'istante t , le leggi della fisica ci

permettono di determinare lo stato negli istanti $t - 1$ e $t + 1$. Qual è l'insieme equivalente di variabili che ci permette di definire lo stato di un gruppo di neuroni dentro il cervello?

Di regola lo stato di una rete di neuroni in un dato istante è definito dai suoi neuroni attivi. Chiamerò questa informazione *stato attivo*, perché indica quali neuroni stanno attivamente trasmettendo impulsi ai loro partner. Ma lo stato attivo rappresenta una descrizione del tutto incompleta dello stato di una rete neurale, dato che, basandosi solamente su di esso, non è possibile prevedere ciò che un circuito farà nel futuro prossimo. Vi sono molte

altre caratteristiche neurali che influenzano il comportamento futuro di un circuito. Una di esse è la plasticità sinaptica a breve termine. È evidente che il comportamento futuro di un gruppo di neuroni dipende non solo da quali neuroni sono attivi ma anche dalla forza effettiva di ciascuna sinapsi in ogni dato istante, un parametro che dipende da ciò che le sinapsi hanno fatto nel passato. La plasticità sinaptica a breve termine non è che una delle numerose caratteristiche neurali che possono indurre variazioni nel breve volgere di centinaia di millisecondi. Mi riferirò a queste caratteristiche come ai tratti definienti dello *stato nascosto* di una rete, nascosto perché celato agli

elettrodi indagatori dei neuroscienziati.

Lo stato attivo di una rete neurale nell'istante t è determinato dal suo stato (attivo e nascosto) nell'istante $t - 1$ e dall'input. Ancora una volta torna utile l'analogia dell'onda concentrica. Si considerino due gocce di pioggia che cadono nello stagno, la prima nell'istante $t = 0$ e la seconda a $t = 100$ ms. Lo stato dello stagno nell'istante $t = 101$ ms dipenderà dall'interazione fra l'input (la seconda goccia di pioggia) e lo stato attuale (le onde generate dalla prima goccia). È importante notare che la configurazione di onde prodotta dalla seconda goccia risulterà diversa a seconda che tale goccia cada 100

oppure 200 ms dopo la prima. Il punto cruciale è che, se ci venisse mostrata un'istantanea delle onde dello stagno scattata a $t = 400$ ms, potremmo capire non solo se sono cadute una oppure due gocce, ma anche, nel caso in cui siano due, l'intervallo trascorso fra la caduta della prima e della seconda goccia: le esperienze recenti dello stagno sono immagazzinate nel suo stato attuale. Analogamente, la reazione di una rete di neuroni è determinata dall'input attuale e da quanto è appena accaduto, che è codificato nello stato attuale della rete. La «reazione» tanto dello stagno quanto della rete neurale può essere definita *stato-dipendente*. In effetti le registrazioni eseguite nella corteccia

uditiva e in quella visiva dimostrano che la risposta neuronale a uno stimolo è fortemente influenzata dagli stimoli precedenti, e dall'intervallo trascorso da quando si sono verificati.^{[11](#)} Le simulazioni al computer hanno evidenziato che, in linea teorica, le reti stato-dipendenti sono in grado di discriminare non solo intervalli semplici, ma anche schemi spaziotemporali complessi come le parole del discorso.^{[12](#)}

Orologi di popolazione

Servirsi delle onde di uno stagno o dello stato variabile di una rete neurale per misurare il tempo non risponde in realtà a una domanda fondamentale: qual è il codice? Ovvero: come si traducono le onde dello stagno o lo stato di una rete neurale in unità di tempo? Ricerche sperimentali e teoriche suggeriscono che un modo per mezzo del quale il cervello codifica il tempo consista nel determinare quali neuroni sono attivi in un dato istante. Abbiamo già incontrato una versione semplice di questa idea discutendo i meccanismi temporali dei neuroni dell' HVC degli uccelli canori: è possibile infatti calcolare la quantità di

tempo trascorsa da quando l'uccello ha iniziato a cantare osservando quali di questi neuroni sono attivi, proprio come è possibile calcolare da quanto tempo è caduta la prima tessera di un domino osservando quale tessera sta cadendo in questo momento. Quello appena descritto è tuttavia un semplicissimo codice basato su una concatenazione; l'ipotesi più generale è che ciascun momento del tempo sia rappresentato da un'ampia sottopopolazione di neuroni attivi. Chiamerò tale metodo di codifica del tempo *orologio di popolazione*. Questo importante concetto fu originariamente elaborato dal neuroscienziato Michael Mauk quando lavorava a Houston presso la Scuola di

Medicina dell'Università del Texas. Negli anni novanta del secolo scorso Mauk ipotizzò che alcune forme di misurazione del tempo si basino su una popolazione di neuroni dinamicamente variabile situata nel cervelletto, una parte anatomicamente distinta del cervello coinvolta in alcuni tipi di tempismo esecutivo.¹³ Supponiamo per esempio che nell'istante $t = 0$ uno stimolo uditivo inneschi uno schema di attività neurale all'interno del cervelletto. L'idea è che 100 ms più tardi sia attiva una sottopopolazione composta da migliaia di neuroni, e che a $t = 200$ ms risulti attiva un'altra sottopopolazione di neuroni. Anche se

alcuni neuroni sono attivi in entrambi gli istanti, e nessun neurone, singolarmente preso, misura il tempo, l'orologio di popolazione permette di capire se sono trascorsi 100 oppure 200 ms.

A mo' di analogia immaginate di guardare di sera le finestre di un grattacielo. A ogni finestra corrisponde una stanza, buia oppure illuminata. Supponete ora che gli abitanti di ogni stanza abbiano un proprio orario caratteristico che si ripete ogni sera. In una finestra la luce si accende non appena il sole tramonta, in un'altra un'ora dopo il tramonto, in un'altra ancora si accende al tramonto, si spegne dopo un'ora e poi si riaccende tre ore dopo. Se ci fossero 100 finestre

potremmo scrivere una stringa di cifre binarie che rappresenta lo stato dell'edificio in ciascun istante: 1 0 1 ... al tramonto, 0 1 1 ... un'ora dopo il tramonto, e così via, laddove ciascuna cifra indica se una data finestra è illuminata oppure no. L'insieme delle finestre illuminate (1) o buie (0) in un dato istante rappresenta dunque lo *stato* dell'edificio (l'equivalente dello stato attivo di una rete neurale). Possiamo raffigurare tale stato segnando dei punti su un grafico costruito in modo tale che ogni asse corrisponda a una finestra differente. Il problema, ovviamente, è che avremmo bisogno di un grafico con 100 assi diversi. Nell'ipotesi in cui

l'edificio avesse solo tre finestre, la [Figura 6.4](#) mostra che il suo stato (ciascun punto del tempo) si potrebbe raffigurare con un grafico tridimensionale nel quale i valori (0 oppure 1) assunti da ciascuna finestra corrispondano rispettivamente agli assi x , y e z . Sebbene non sia possibile visualizzare un grafico così concepito in uno spazio a 100 dimensioni, il principio è esattamente lo stesso. Unendo i pallini che rappresentano lo stato del sistema in ciascun punto del tempo possiamo visualizzare la *traiettoria* dell'edificio, cioè il modo in cui lo stato dell'edificio varia nel tempo. Benché non sia stato progettato per fungere da orologio, vediamo perciò

che – ammesso che possieda una dinamica interna (gli schemi variabili delle finestre buie o illuminate) – potremmo usare il grattacielo per misurare il tempo.

		Finestra		
		#1	#2	#3
Tempo	0	0	0	0
	1	0	1	1
	2	1	1	1
	3	1	0	0
	4	0	1	0
	5	1	1	0

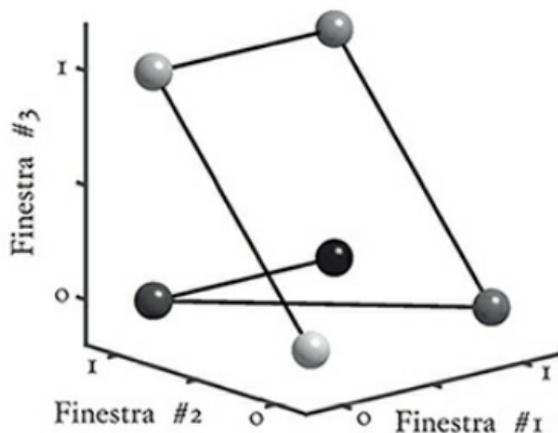


Figura 6.4

Il tempo codificato negli stati variabili delle finestre di un edificio. Gli stati delle tre finestre in ciascun punto del tempo (mostrati nella tabella a sinistra) sono rappresentabili in modo equivalente come una traiettoria nello spazio tridimensionale (a destra).

Orologi evento-specifici

Ora comprendiamo dunque come uno schema variabile di neuroni attivi sia potenzialmente impiegabile come cronometro. Ma un'intuizione chiave contenuta nella teoria di Michael Mauk è che un circuito composto da un numero elevato di neuroni non dà origine a un unico cronometro, bensì a molti cronometri. Avere un circuito che funziona come una moltitudine di cronometri diversi potrebbe non offrire vantaggi immediatamente evidenti; questa strategia crea tuttavia un sistema computazionale più potente.

Forse in cucina avete un timer che usate per controllare la cottura di un

uovo al guscio, della pasta o di una torta. Una strategia alternativa potrebbe essere quella di procurarsi tre diversi timer, ciascuno dedicato a un unico compito e dotato di un segnale sonoro differente. Avere questi tre dispositivi sul piano di lavoro potrebbe apparire una scomodità, ma un simile apparato evento-specifico possiede un vantaggio importante: se entrate in cucina e sentite un segnale sonoro, sapete immediatamente che cosa spegnere o che cosa togliere dal forno. In altre parole, i timer evento-specifici servono a indicarci anche *quali* eventi sono in svolgimento.

Per meglio comprendere l'utilità di avere molteplici cronometri all'interno

di un unico circuito neurale, immaginiamo una fila di migliaia di lucine a LED sistemate su un albero di Natale, e supponiamo che, ogni volta che premiamo l'interruttore, il loro schema di illuminazione vari in base a un criterio costante. Possiamo immaginare molti tipi diversi di schema: una semplice fila di lucine che si accendono e spengono in successione o, come nel caso delle finestre del nostro grattacielo, schemi di accensione e spegnimento di elevata complessità. Il vantaggio del primo esempio, consistente in uno schema a catena, è che il codice risulta semplice da decifrare: la prima lucina accesa rappresenta $t = 1$,

la seconda $t = 2$ e così via. Lo svantaggio è che esiste un solo schema di questo tipo, per cui esiste un solo cronometro. Per contro, gli schemi complessi sono difficili da decifrare, ma permettono di creare un numero enorme di cronometri a partire dalla medesima batteria di lucine.

Supponiamo che la nostra batteria di lucine natalizie abbia due interruttori, uno controllato da Alice e uno da Bob. Supponiamo che quello di Alice attivi, a intervalli di 1 secondo, i seguenti schemi spaziali di illuminazione (ciascun numero indica la posizione della lucina nella fila):

$$t=1 \ 5 \ 10 \ 15 \ 20$$

$t=2$ 6 12 18 24

$t=3$ 7 14 21 28

...

e che l'interruttore di Bob produca invece questa sequenza (si noti che nel nostro esempio ciascuno schema segue un algoritmo specifico):

$t=1$ 1 2 3 4

$t=2$ 1 4 6 8

$t=3$ 1 6 9 12

...

Se ora vi viene mostrata una fotografia dell'albero di Natale e vedete che le lucine numero 8 16 24 32 ... sono accese, non solo sapete che l'immagine

è stata scattata 4 secondi dopo l'accensione dell'interruttore, ma che è stata Alice a premerlo. Le nostre lucine natalizie misurano il tempo *e* lo spazio, dato che misurano quanto tempo è passato e quale interruttore è stato acceso.

Perché il cervello dovrebbe aver bisogno di cronometri che funzionano in questo modo? Perché su una scala temporale che va dai millesimi di secondo ad alcuni secondi non ha soltanto la necessità di misurare il tempo: ha bisogno di compiere delle azioni in momenti specifici. Un esempio usuale di tempismo esecutivo negli animali riguarda una forma classica di condizionamento operante definita

condizionamento del battito palpebrale: ripetutamente esposti a un segnale uditivo seguito, 250 ms dopo, da un soffio d'aria diretto alla cornea, gli esseri umani e altri animali imparano a battere le palpebre in risposta al segnale. Ma non lo fanno appena odono quest'ultimo: le palpebre si chiudono infatti nell'istante più adatto ad anticipare l'arrivo del soffio d'aria. In altri termini, gli animali non solo imparano a battere le palpebre, ma imparano anche *quando* batterle. Si ritiene che ciò sia importante perché, nelle situazioni in cui la cornea potrebbe essere danneggiata da stimoli pericolosi, non è probabilmente una buona idea

tenere gli occhi chiusi troppo a lungo.¹⁴
Ma gli animali sono in grado di battere le palpebre in due momenti differenti in risposta a segnali sonori diversi? Questo è esattamente ciò che ha dimostrato Michael Mauk. Il suo laboratorio ha dimostrato che i conigli sono in grado di imparare a battere le palpebre circa 150 ms dopo l'inizio di un segnale uditivo a bassa frequenza e 750 ms dopo un segnale ad alta frequenza. Inoltre, se il cervelletto veniva lesionato, questo meccanismo temporale differenziale scompariva, il che suggerisce che i cronometri neurali si trovino all'interno dei circuiti del cervelletto.

Come ulteriore esempio

dell'importanza di avere una molteplicità di cronometri, si consideri una persona che sa suonare due canzoni al pianoforte. Dopo un secondo dall'inizio, nella prima canzone occorre suonare un do, nella seconda un mi. Un cronometro tradizionale risulterebbe utile, perché vi direbbe quando è passato un secondo; ma non saprebbe dirvi quale tasto dovete suonare. Viceversa, impiegando come cronometri schemi spaziotemporali dinamici differenti – per esempio i diversi schemi di illuminazione usati da Alice e da Bob – è possibile risolvere non solo il problema di misurare il tempo, ma anche quello di capire che cosa fare in ogni punto del tempo. Il cervello può

applicare questa strategia ponendo in connessione la popolazione di neuroni attiva un secondo dopo l'inizio della prima canzone con i neuroni motori preposti a premere il do sul pianoforte, e i neuroni attivi un secondo dopo l'inizio della seconda canzone con i neuroni motori preposti a premere il mi.

Dinamica cerebrale

I neuroscienziati hanno osservato molti esempi, sia semplici che complessi, di schemi temporali di attività neurale che sembrano codificare il tempo. In un esperimento condotto dal neuroscienziato Joe Paton al Champalimaud Center for the Unknown di Lisbona, un gruppo di ratti fu addestrato a infilare il muso nell'una o nell'altra di due «finestre» a seconda della lunghezza di un intervallo uditivo. Per ogni prova i ratti udivano due segnali, separati da intervalli compresi fra 0,6 e 2,4 secondi. Gli animali erano ricompensati per aver infilato il muso nella finestra di sinistra quando

l'intervallo durava meno di 1,5 secondi, e per averlo infilato in quella di destra quando l'intervallo era più lungo di 1,5 secondi. I ratti furono in grado di eseguire il compito assai bene: ad esempio, in risposta a intervalli di 1 e 2 secondi scelsero la finestra corretta nel 90 per cento circa dei casi. Mentre gli animali svolgevano il compito, i ricercatori registrarono il comportamento di decine di neuroni situati nel corpo striato, una zona del cervello coinvolta nel movimento e in alcune forme di apprendimento. Nel corso delle molte prove eseguite risultò che molti di questi neuroni si attivavano sistematicamente in momenti simili dell'esperimento. Per esempio, se i ratti

erano esposti all'intervallo da 2,4 secondi, alcuni neuroni si attivavano precocemente e altri tardivamente; quando la loro attività fu ordinata in base al momento dell'attivazione ne emerse uno schema concatenato $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$, sebbene questa sia una descrizione alquanto semplificata dello schema effettivo.¹⁵ In occasione delle prove in cui l'intervallo proposto era prossimo al confine di 1,5 secondi, i ratti, come ci si poteva attendere, mostrarono maggiori probabilità di commettere errori. È interessante notare che era possibile prevedere questi errori sulla base della dinamica neuronale. Quando per esempio gli schemi

«andavano veloce» (cioè si svolgevano più rapidamente della media) i ratti avevano maggiori probabilità di sbagliare per eccesso, e viceversa. Nel complesso queste ricerche forniscono conferme stringenti alla tesi secondo cui l'azione di questi neuroni contribuisce alla capacità di misurare il tempo degli animali, sebbene – come accade in genere nelle neuroscienze – ciascuna ricerca, da sola, non provi l'esistenza di una relazione causale univoca, cioè, nel nostro caso, non provi che i neuroni in questione presiedano effettivamente alla misurazione dell'intervallo fra i segnali uditivi.

Analoghi schemi concatenati di attività neurale sono stati osservati in

diverse altre parti del cervello. I neuroni dell'ippocampo dei ratti, per esempio, possono attivarsi in momenti specifici dopo che l'animale ha iniziato un compito come correre su una ruota o come attendere una quantità di tempo prestabilita prima di fornire una risposta motoria che gli frutta una ricompensa.¹⁶

Un aspetto interessante è che, in un certo numero di ricerche, sono state osservate sequenze concatenate di attività che differiscono a seconda dei particolari del compito proposto. Per esempio, gli stessi neuroni potevano attivarsi in momenti diversi a seconda dell'odore che marcava l'inizio del compito, il che suggerisce che tali neuroni non stessero

solamente misurando il tempo assoluto ma, come per le traiettorie di Alice e Bob, stessero misurando il tempo e «ricordando» lo stimolo che aveva innescato lo schema.

Mentre gli animali eseguono dei compiti temporali, i neuroscienziati hanno anche potuto osservare schemi di attività neurale variabili nel tempo molto più complessi. Nel caso di questi orologi di popolazione può accadere che neuroni differenti comincino ad attivarsi in momenti differenti, ciascuno per quantità di tempo diverse, e che talvolta si riattivino successivamente.¹⁷ Simili schemi spaziotemporali sono sistematicamente replicabili, eppure

all'occhio umano potrebbero apparire casuali. Il fatto che in certi casi lo schema spaziotemporale dell'attività neurale non abbia apparentemente una spiegazione logica sembra sconcertante. Ma forse il punto è proprio questo. Ciò che intendiamo con l'espressione «schema casuale» è che in tale schema tutti i neuroni hanno in ogni dato istante più o meno la stessa probabilità di accendersi o di spegnersi. E, grazie alla teoria dell'informazione, sappiamo che un codice nel quale tutti i simboli o gli elementi sono usati con la medesima probabilità offre maggiori risorse per immagazzinare o trasmettere le informazioni. L'inglese, ad esempio, non è un codice particolarmente efficiente,

poiché la frequenza d'uso varia ampiamente da una lettera all'altra: se scrivete al computer in inglese, probabilmente batterete il tasto *e* più o meno in 12,5 casi su 100, mentre la frequenza d'uso del tasto *q* è appena dello 0,1 per cento. Benché talvolta ai neuroscienziati appaiano poco eleganti, gli schemi spaziotemporali di attività neurale complessi e apparentemente casuali potrebbero fornire al cervello il mezzo più efficiente per costruire un gran numero di orologi di popolazione. È inoltre possibile che il cervello si serva degli schemi complessi prodotti in determinate aree per indurre la generazione di schemi più semplici,

concatenati, in altre aree.

È probabile che, anche per i periodi che vanno dalle centinaia di millisecondi ad alcuni secondi, il cervello impieghi molteplici meccanismi per misurare il tempo. Mentre gli animali svolgono dei compiti temporali, si osservano infatti altre forme di attività neurale. La firma neurale forse più comunemente riscontrata in associazione con lo scorrere del tempo è detta *tasso di attivazione a rampa* (*ramping firing rate*): al pari della quantità di sabbia che si accumula in una clessidra man mano che il tempo scorre, il tasso di attivazione (il numero di picchi in una determinata unità di tempo) di alcuni

neuroni aumenta nel tempo in maniera lineare. Questo genere di schemi si osserva tipicamente quando gli animali vengono addestrati a generare una risposta motoria dopo un determinato ritardo. Ma non è chiaro se siano effettivamente i neuroni a rampa (*ramping neurons*) a fungere da cronometri o se invece tali neuroni leggano il tempo da altri circuiti cerebrali al fine di attivare una risposta motoria nel momento appropriato. [18](#)

Caos

Nelle discussioni fin qui svolte abbiamo dato per scontata una delle caratteristiche cruciali di un orologio: la riproducibilità. Affinché gli schemi spaziotemporali di attività neurale all'interno di una popolazione di neuroni siano impiegabili come cronometri occorre che uno stesso contesto e uno stesso stimolo inneschino ogni volta il medesimo schema. I dati sperimentali degli studi precedentemente citati confermano che le cose stanno così: tutte le volte che un uccello canoro canta è possibile osservare la stessa traiettoria neurale (anche se da una prova all'altra vi è una considerevole dose di

variazione). Un mistero di lunga data è tuttavia il modo esatto col quale il cervello riesce nel difficile compito di generare ogni volta lo stesso schema.

I modelli al computer mostrano che le reti neurali composte da neuroni connessi in maniera ricorrente sono in grado di creare schemi di attività in continua evoluzione, ossia schemi che potenzialmente ben si adattano a codificare il tempo. Il problema è che spesso schemi simili non sono riproducibili: reti di questo tipo si comportano sovente in maniera caotica. In senso matematico il termine *caos* è adoperato per descrivere sistemi che manifestano un'elevata sensibilità al rumore e alle condizioni iniziali (cioè

allo stato del sistema all'inizio di ciascuna prova). L'esempio classico è quello del tempo atmosferico e del cosiddetto effetto farfalla: un evento minuscolo che si verifica in un determinato punto dello spazio e del tempo, ad esempio una farfalla che batte le ali in Amazzonia alle ore 12 del 1 febbraio, può generare un effetto domino che, a distanza di una settimana, modifica le condizioni meteorologiche a New York. Il caos è spesso osservabile nei sistemi fisici non lineari che retroagiscono su se stessi, fra cui il tempo atmosferico e le palle da biliardo. Le reti di neuroni includono entrambe queste condizioni. Primo, i neuroni sono

non lineari, cioè l'output di un neurone non è in relazione di dipendenza lineare dall'input che riceve. Secondo, le reti corticali sono caratterizzate, come detto, da un elevato livello di retroazione o *ricorrenza*: in altri termini, ciò che un neurone fa nell'istante $t = 1$ influenza quello che altri neuroni fanno a $t = 2$, il che a sua volta influenza ciò che il primo neurone fa a $t = 3$.

Per afferrare il problema posto dal caos allorché si utilizzano sistemi dinamici non lineari per misurare il tempo, si consideri una semplice equazione matematica detta *mappa logistica* ([Fig. 6.5](#)). Si tratta di un'equazione che descrive l'evoluzione di un valore x (compreso fra 0 e 1)

attraverso successivi passi temporali. Per ogni passo il valore corrente è interamente determinato dal valore di x nel passo temporale precedente. Nonostante la semplicità dell'equazione, gli schemi che emergono sono sorprendentemente complessi, e minuscole variazioni iniziali del valore di x possono produrre differenze radicali nei suoi valori successivi.

Passo temporale	Sequenza 1	Sequenza 2
1	0.9900	0.99001
2	0.0386	0.0386
3	0.1448	0.1446
4	0.4829	0.4825
5	0.9739	0.9738
6	0.0993	0.0995
7	0.3488	0.3494
8	0.8859	0.8866
9	0.3943	0.3922
10	0.9314	0.9296
11	0.2492	0.2551
12	0.7296	0.7410
13	0.7694	0.7484
14	0.6920	0.7343
15	0.8313	0.7609
16	0.5471	0.7095
17	0.9664	0.8038
18	0.1268	0.6150

$$x_{t+1} = 3,9 x_t (1 - x_t)$$

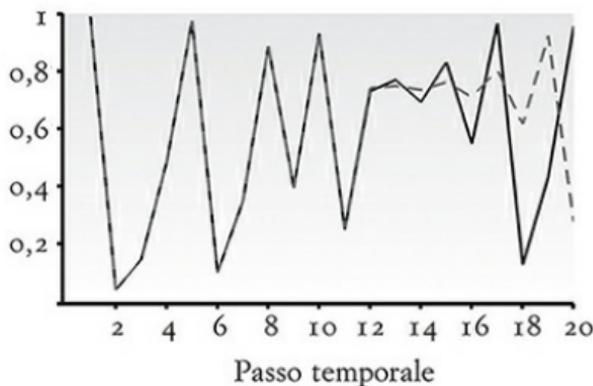


Figura 6.5

Esempio di equazione che genera caos. In questa equazione il valore di x per ogni successivo passo temporale ($t+1$) è determinato dal valore di x nel passo temporale attuale (t). Anche partendo da due valori di x molto vicini (0,99 per la sequenza 1 e 0,99001 per la sequenza 2), i valori di x via via divergono, come mostrano la tabella e il grafico. Dapprincipio la divergenza è impercettibile, ma verso il diciottesimo passo i valori di x delle due sequenze divergono radicalmente.

Si noti che possiamo usare la tabella della [Figura 6.5](#) come una sorta di cronometro. Se sapete che il valore iniziale di x era 0,9900 e vi informo che il valore attuale è 0,5471, capite che sono passate 16 unità temporali. Il problema, però, è che tale sistema è estremamente sensibile al rumore o a minuscoli errori di misura. Se ad esempio, come accade nella seconda sequenza, il valore iniziale di x è 0,99001 invece che 0,9900, il valore al passo temporale 16 risulta 0,7095 anziché 0,5471. Lo stato di un sistema caotico – cioè, nel nostro esempio, il valore di x – diverge rapidamente in conseguenza di perturbazioni minime, e

ciò significa che in pratica il sistema non genera costantemente lo stesso schema. I sistemi caotici sono orologi davvero pessimi.

Le simulazioni al computer di modelli nei quali la connettività fra i neuroni è determinata in modo casuale dimostrano che tali *reti neurali ricorrenti casuali* possono generare schemi di attività autoperpetuanti nei quali ad ogni passo temporale la rete si trova in uno stato differente. In teoria questi schemi spaziotemporali sarebbero impiegabili per misurare il tempo. Il problema è che negli anni ottanta del xx secolo il fisico e neuroscienziato computazionale israeliano Haim Sompolinsky e i suoi colleghi hanno

provato che in molti casi gli schemi di attività che emergono da simili reti connesse in maniera casuale sono caotici.¹⁹ Ciò ha posto un grave dilemma ai neuroscienziati. Da un lato la corteccia è costituita da reti connesse in maniera ricorrente che sono in grado di generare schemi dinamici di attività neurale riproducibili (altrimenti non saremmo capaci di suonare lo stesso pezzo al pianoforte o di fare una firma replicabile). Dall'altro gli studi teorici suggeriscono che le reti corticali siano caotiche.

Ancora non è chiaro in quale modo i circuiti all'interno della nostra corteccia cerebrale risolvano il problema del

caos. Sono state avanzate diverse teorie per spiegare come le reti neurali ricorrenti possano produrre schemi variabili complessi non caotici, cioè schemi che possano essere attivati in maniera ripetibile. Una di tali teorie ipotizza che esistano delle regole di apprendimento sinaptico che sostanzialmente permettono alle reti di imparare a non essere caotiche, cioè che permettono loro di “scurire” determinati schemi o determinate traiettorie neurali. Se opportunamente calibrate, le sinapsi di un modello computazionale di rete neurale sono in grado, almeno in teoria, di produrre traiettorie complesse e non caotiche. Come illustrato dalla [Figura 6.6](#), questa strategia offre un mezzo

potente per generare schemi motori complessi variabili nel tempo.

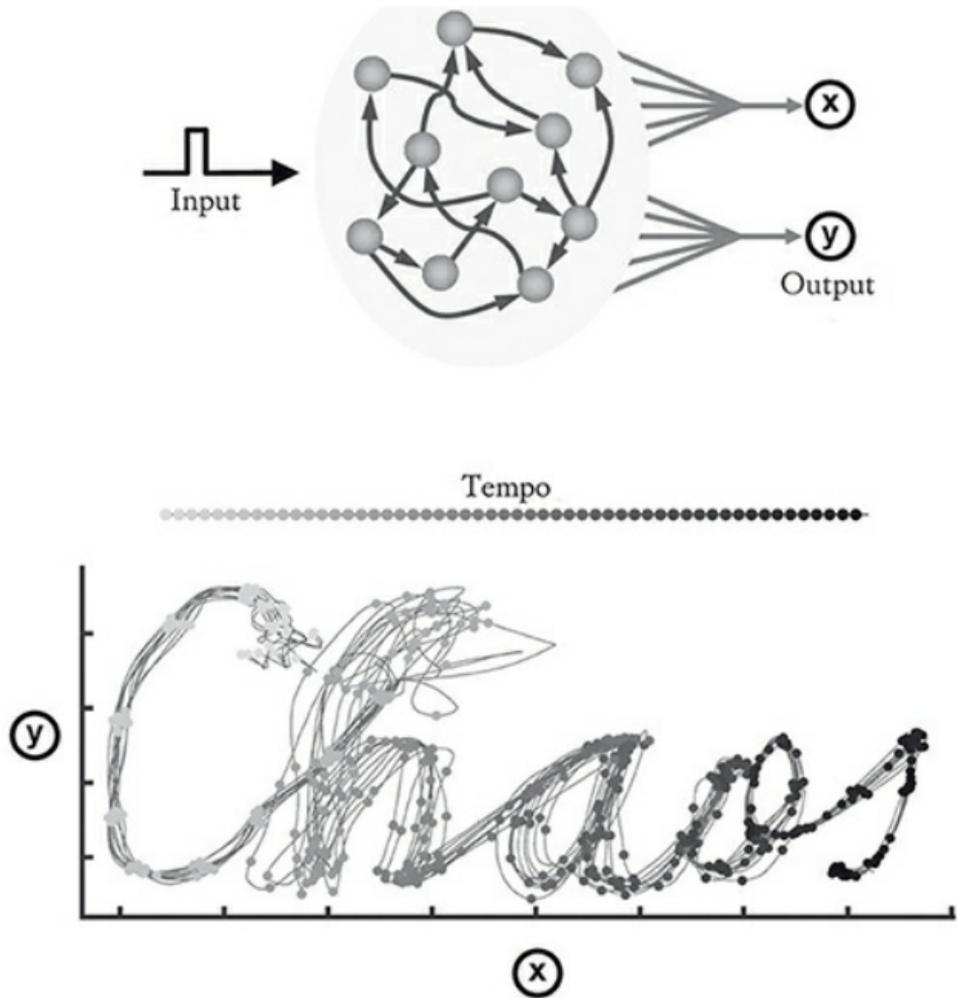


Figura 6.6

Una rete ricorrente che genera uno schema motorio variabile nel tempo. In questa simulazione una rete neurale ricorrente risulta composta da unità interconnesse che corrispondono a dei

neuroni (schematizzati al centro dell'immagine in alto). Le unità della rete ricorrente ricevono un breve segnale di input e contattano due unità di output. L'attività di queste due unità di output corrisponde alle posizioni di una penna sugli assi X e Y di un grafico. L'addestramento consiste nel calibrare mediante una regola di apprendimento i pesi delle connessioni fra unità ricorrenti e unità di output. Dopo l'addestramento, in risposta a un breve input la rete ricorrente genera uno schema di attività complesso che guida gli output in modo tale da scrivere la parola *Chaos*. Gli schemi motori, ad esempio le cifre scritte a mano, sono intrinsecamente temporali, per cui la rete codifica anche il tempo. I puntini sfumati impressi sulle linee rappresentano il tempo. La rete non è caotica, come dimostra il fatto che lo schema motorio si ripristina dopo che la rete ricorrente è stata perturbata durante la fase ascendente della *h* (sono sovrapposti qui i risultati di dieci prove).

(Modificato da Laje e Buonomano 2013)

La simulazione illustra lo schema di

attività, riprodotto nel corso di molteplici sequenze o prove, di 10 neuroni appartenenti a una rete composta da 800 neuroni interconnessi. Ciascuna prova inizia con un breve input, che determina lo stato iniziale di tutti i neuroni della rete simulata. Da questo stato iniziale in poi si sviluppa uno schema di attività dinamicamente variabile, vale a dire che la rete percorre autonomamente una traiettoria che si manifesta in uno spazio a 800 dimensioni. Possiamo visualizzare in uno spazio tridimensionale una versione semplificata di questa traiettoria, replicata più volte. Ora, per attingere al potenziale computazionale di questa rete possiamo collegare tutti i suoi 800

neuroni a due soli neuroni di output, e convenire che si tratta di neuroni motori preposti al controllo dei movimenti di una penna su un foglio di carta lungo gli assi x e y . Benché la cosa sia piuttosto controintuitiva, dal momento che la rete ricorrente che guida i due neuroni motori produce uno schema variabile nel tempo di tipo complesso (più specificamente, «alto-dimensionale»), è possibile far sì che i neuroni di output producano quasi ogni genere di schema (calibrando la forza delle sinapsi che collegano le reti ricorrenti ai neuroni di output). Nella figura ciò si dimostra facendo «scrivere» ai due neuroni la parola *Chaos*. È importante osservare che,

poiché le connessioni ricorrenti sono state opportunamente calibrate, la rete non è caotica. È addirittura possibile perturbare («urtare») la rete nel bel mezzo della traiettoria: sarà in grado di ritrovare il percorso corretto. In sostanza, il sistema è dotato di memoria. La rete ricorrente possiede l'interessante caratteristica di riuscire a ricordare ciò che stava facendo: anche quando viene deviata dalla sua traiettoria originale è in grado di «ritornare» al compito che stava svolgendo e completarlo. Si noti inoltre che scrivere la parola *Chaos* richiede un adeguato tempismo motorio, e che il movimento della penna è utilizzabile per misurare il tempo. Di fatto i puntini

della [Figura 6.6](#) sono marcatori temporali: conoscere la posizione attuale della penna ci permette di sapere quanto tempo è trascorso dal momento dell'input. Il succo è che, nelle reti neurali ricorrenti, calibrare la forza delle connessioni sinaptiche rende possibile «domare» il caos.

A questo punto è utile fare una pausa e domandarsi: *come fa, esattamente, la rete a scrivere la parola «Chaos»?* (o, più precisamente, dove si trova l'informazione che genera lo schema bidimensionale riconosciuto dal cervello umano come la parola *Chaos*?). Si tratta di una domanda profonda, per rispondere alla quale occorre

discostarsi dalle concezioni tradizionali della computazione e della memoria. L'informazione che genera il termine *Chaos* è infatti ovunque e in nessun luogo. Ciascuna sinapsi e ciascuno dei neuroni simulati contribuiscono allo schema, ma nessuna singola sinapsi o nessun singolo neurone è davvero indispensabile. Lo schema è una proprietà *emergente*: *l'intero è maggiore della somma delle parti*.

La rete sopra descritta è solo una simulazione al computer, una simulazione semplice che incorpora numerosi assunti. Quand'anche cogliesse alcuni dei principi di funzionamento della corteccia, sarebbe di gran lunga troppo semplice e rigida per dare conto

della stupefacente capacità del cervello di imparare a riconoscere e generare i complessi schemi che stanno alla base del linguaggio e della musica. Ciononostante vi è un sostegno sperimentale crescente alla tesi secondo cui molte delle computazioni eseguite dal cervello, in particolar modo quelle di natura temporale, si fondano sulla sua capacità di generare complesse traiettorie neurali variabili nel tempo e utilizzabili per produrre gli schemi spaziotemporali sottesi alla nostra capacità di raggiungere e girare la pagina di un libro o di suonare il pianoforte.^{[20](#)}

La necessità di misurare il tempo

pervade quasi tutti i compiti che il cervello deve eseguire, e compiti differenti presentano requisiti temporali differenti: a volte è necessario distinguere una minima da una semiminima, in altri casi occorre tamburellare un messaggio in codice Morse, rilevare il tempo di inizio della sonorità delle consonanti *p* e *b* oppure prevedere quando il semaforo diventerà verde. Per risolvere questa gamma di problemi temporali il cervello ha un insieme di meccanismi di elaborazione del tempo interrelati e distribuiti in tutti i propri circuiti. Tuttavia è interessante notare che gli orologi dentro il cervello somigliano ben poco agli orologi ideati *dal* cervello umano.

La forza delle sinapsi varia nel tempo, il tasso di attivazione dei neuroni cresce e diminuisce linearmente, i neuroni oscillano con determinate frequenze e l'attività delle reti di neuroni cambia dinamicamente nel tempo perché misurare il tempo è una delle cose che i neuroni hanno imparato a fare nel corso dell'evoluzione. Perciò chiedersi quali neuroni o circuiti neurali misurino il tempo all'interno del cervello è un po' come chiedersi quali dei miliardi di transistor della CPU di un computer siano incaricati di eseguire la logica binaria: lo sono tutti, è la loro ragion d'essere.

Parte seconda

**La natura fisica e mentale
del tempo**

7:00

Tenere il tempo

Il tempo sta all'orologio come la mente sta al cervello.

Dava Sobel

Il nucleo di un neurone, e i cromosomi dentro di esso, sono invisibili all'occhio umano come lo sono le lune di Nettuno. Nel dominio del tempo la durata del battito di ali di un colibrì si sottrae ai nostri organi di senso quanto la deriva dei continenti. Allo stesso modo in cui costruiamo microscopi e telescopi per vedere

oggetti che si trovano al di fuori della nostre limitate capacità visive, abbiamo sviluppato metodi e macchine – microscopi e telescopi temporali, per così dire – per cogliere scale temporali molto più brevi e molto più lunghe di quelle che il cervello è in grado di misurare. I telescopi temporali ci hanno consentito di stabilire che il percorso evolutivo degli esseri umani e delle scimmie antropomorfe si biforcò circa 7 milioni di anni fa, e di predire che nel giro di qualche miliardo di anni il Sole si trasformerà in una stella gigante rossa e alla fine inghiottirà Mercurio e Venere. All'estremo opposto, i microscopi temporali (gli orologi ad alta precisione) ci permettono di

scindere il secondo in unità sempre più piccole – millisecondi, microsecondi, nanosecondi, picosecondi... – via via sempre più distanti dalle umane capacità di percezione e comprensione. Gli odierni orologi atomici misurano il tempo con un'accuratezza misurabile in *attosecondi*, dando agli scienziati la invero piuttosto rara opportunità di utilizzare il prefisso *a t t o* (10^{-18}). Questa capacità di stimare periodi di tempo dell'ordine dei miliardi di anni, e di suddividere il secondo in attosecondi, è un risultato della fisica, e la fisica è, in parte, il risultato del nostro desiderio di misurare il tempo.

L'astronomia è un seme che ha dato

come frutto la scienza fisica, ed è sorta dall'esigenza di situare noi stessi non solo nello spazio ma anche nel tempo. Fra le altre cose, l'astronomia antica fornì un mezzo per misurare le stagioni, per stabilire la lunghezza dell'anno e per individuare i momenti in cui venerare gli dei celesti. I progressi successivi della nostra capacità di misurare il tempo coincisero in parte, e non a caso, con le rivoluzioni che hanno cambiato la fisica. Per esempio, un evento fondamentale della storia dell'orologeria risale a uno dei periodi più innovativi della storia della fisica: il fisico olandese Christiaan Huygens realizzò infatti il primo orologio a pendolo ad alta precisione nel 1657, quindici anni dopo la morte di

Galileo Galilei e quando Isaac Newton era un adolescente.

Il tempo e la fisica sono inestricabilmente legati. Non solo le domande circa la natura del tempo sono appannaggio della fisica, ma è la nostra comprensione delle leggi fisiche che ha permesso agli scienziati di costruire gli orologi magnificamente precisi impiegati negli esperimenti fisici. Nei prossimi capitoli esamineremo la fisica del tempo e ci chiederemo se il modo di concepire il tempo della fisica sia compatibile con quello delle neuroscienze. Cominceremo esaminando la fisica e la storia del tempo meccanico.

Sui neuroni e sulla proliferazione nucleare

Proprio come il cervello possiede meccanismi diversi per misurare il tempo prospettivamente e retrospettivamente, gli scienziati hanno elaborato metodi del tutto differenti per misurare il tempo a seconda che occorra determinare la quantità di tempo che è trascorsa a partire da un dato momento del passato fino al presente, o la quantità di tempo che trascorrerà a partire dal presente fino a un dato momento del futuro. Mentre in genere utilizziamo orologi tradizionali per misurare il tempo prospettivamente, dobbiamo affidarci a un genere diverso di

«orologio» per misurarlo retrospettivamente. Fortunatamente la natura è piena di orologi retrospettivi, perché il funzionamento dell'universo è tale per cui i cambiamenti che avvengono intorno a noi (e dentro di noi) obbediscono a un insieme di leggi prestabilite. Così le onde di uno stagno ci permettono di ricostruire gli eventi di alcuni secondi prima, un medico legale è in grado di individuare l'ora della morte di una persona sulla base della temperatura corporea del cadavere, ed è possibile stabilire quando una biforcazione evolutiva ha dato origine a due specie differenti analizzando il loro grado di somiglianza genetica. Tuttavia è stata l'invenzione della datazione

radiometrica a fornire uno dei metodi più rivoluzionari per misurare retrospettivamente il tempo. Ma come funziona la datazione radiometrica? Come fanno gli atomi a «sapere» quanto tempo è passato? Per rispondere a questa domanda analizzeremo il modo in cui la datazione radiometrica e la proliferazione nucleare contribuirono ad abbattere un dogma secolare delle neuroscienze.

Per quasi tutto il xx secolo i neuroscienziati furono convinti che, a differenza di ciò che accade per la maggior parte delle cellule del corpo umano, negli umani adulti non si formino nuovi neuroni. Ma negli anni novanta del

xx secolo le ricerche cominciarono a indicare in modo via via più convincente che in alcune aree del cervello dei ratti e dei topi nascono nuovi neuroni, un processo che va sotto il nome di *neurogenesi adulta*. Ma come accertare se ciò vale anche per gli esseri umani, i cui neuroni in genere possono essere studiati solo dopo la morte di un individuo? Benché sia possibile conoscere l'età di un individuo quando muore, è ben difficile che i singoli neuroni rechino stampata la propria data di nascita.

Nel corso degli anni cinquanta e dei primi anni sessanta i test atomici in superficie, eseguiti in massima parte dagli Stati Uniti e dall'Unione Sovietica,

fecero quasi raddoppiare la quantità del radioisotopo carbonio-14 presente nell'atmosfera. Il livello massimo fu raggiunto nel 1963, l'anno della firma del Trattato sulla messa al bando parziale degli esperimenti nucleari, e da allora iniziò a calare. Questi incrementi del carbonio-14 atmosferico si ripercossero su tutti gli organismi viventi, dato che mediante la fotosintesi le piante incorporano il carbonio nelle loro vie biochimiche; e poiché il carbonio del nostro corpo proviene dalle piante, i test atomici produssero aumenti rilevabili di carbonio-14 nel DNA umano. Gli atomi di carbonio che vengono incorporati nel DNA quando una

cellula «nasce» (mediante la divisione di una cellula precursore) possono rimanere nel DNA per tutta la vita della cellula. Pertanto, se negli adulti non si formassero nuovi neuroni, oggi i neuroni delle persone nate prima dell'era dei test atomici dovrebbero avere bassi livelli di carbonio-14. Se invece i neuroni continuassero a dividersi, alcuni di essi dovrebbero presentare livelli più alti di carbonio-14, a causa dell'aumento di quest'ultimo registratosi a partire dai tardi anni cinquanta. In Svezia alcuni ricercatori hanno analizzato il tessuto cerebrale di persone decedute, riscontrando che la grande maggioranza dei neuroni degli individui nati prima del 1955 possedeva bassi

livelli di carbonio-14 nel proprio DNA.¹

In altre parole, la maggior parte dei neuroni non si era formata nell'età adulta. Ma, come predetto dai dati sugli animali, in una sottopopolazione di neuroni dell'ippocampo sono stati riscontrati livelli più elevati di carbonio-14, e ciò dimostra che negli esseri umani qualche forma di neurogenesi adulta può verificarsi. Questa strana intersezione fra le neuroscienze, la proliferazione nucleare e l'impiego del carbonio radioattivo come orologio retroattivo è stata determinante per sovvertire il dogma secondo cui negli esseri umani adulti i neuroni non si rigenererebbero mai.

Per tornare ora alla nostra domanda: come fanno gli atomi di carbonio a «sapere» quanto tempo è passato? Può un singolo atomo misurare il passaggio del tempo? Comprendere i principi sui quali si basa la datazione radiometrica serve a ricordarci che esistono molti modi diversi di misurare il tempo, e che, al pari di ciò che avviene nel cervello, in campo tecnologico ricorriamo a meccanismi radicalmente diversi per misurare, rispettivamente, il tempo retrospettivo e quello prospettivo.

Gli elementi sono definiti dal numero di protoni presenti nei loro nuclei. Gli isotopi di un elemento sono varianti di quell'elemento dotate di un numero

differente di neutroni. Alcune di queste varianti sono dette radioattive perché sono instabili: nel corso del tempo decadono per raggiungere una configurazione atomica stabile. L'instabilità può essere molto stabile: il carbonio-14, per esempio, ha un tempo di dimezzamento di 5730 anni. Perciò, se partiamo con 1000 atomi di carbonio-14, dopo 5730 anni possiamo aspettarci di avere 500 atomi di carbonio radioattivo. È chiaro allora che il numero di atomi di carbonio radioattivo rimanenti offre un metodo per misurare il tempo retroattivamente, e per individuare pertanto l'età dei fossili, delle pitture rupestri, dei manufatti preistorici, dei manoscritti antichi e

persino dei neuroni. Ma da dove proviene il numero 5730? Come fa un atomo di carbonio a “sapere” quando deve decadere? La risposta è che non lo sa. La cosa sorprendente è infatti che, sebbene la datazione radiometrica al carbonio sia uno dei metodi più affidabili per misurare retrospettivamente il tempo, un singolo atomo di carbonio-14 non reca in sé alcun segno della propria età.

Il principio della datazione radiometrica si basa su uno dei metodi di misurazione del tempo più semplici che esistano: il *caso*. Immaginate che ci siano 1000 persone tenute prigioniere in un casinò, e che ciascuna di esse abbia

10 monete. I loro guardiani, crudeli ma con un debole per la statistica, annunciano che potrà riavere la libertà solo chi, lanciando le 10 monete in serie, otterrà sempre testa. Se ogni persona impiega in media un minuto per ciascuna serie di lanci allora, basandoci sul numero di ostaggi ancora nella sala, possiamo stimare quanto tempo è passato. Chiaramente, meno persone ci sono nella sala, maggiore è il tempo trascorso; inoltre, dato che la probabilità di ottenere solo teste in una serie di 10 lanci è calcolabile, siamo in grado di stimare la quantità di tempo che è trascorsa. Quando si lanciano 10 monete, la probabilità che tutte e 10

diano testa è 1 su 2^{10} (1/1024). Partendo da questo numero è possibile calcolare che occorrono 710 serie affinché metà dei prigionieri ottenga la libertà: 710 minuti, ovvero 11 ore e 50 minuti.² Perciò ogni dodici ore circa il numero di persone nella sala dovrebbe dimezzarsi: se vediamo 250 persone nella sala, è probabile che siano rinchiuso lì dentro da poco meno di un giorno.

La datazione radiometrica si fonda su un processo probabilistico molto simile. A puro scopo intuitivo possiamo immaginarci che un neutrone di un atomo di carbonio-14 sia costantemente impegnato a cercare di sfuggire al

nucleo attraversando la nuvola di elettroni che avvolge il nucleo stesso (in realtà, quando decade, un neutrone rilascia un elettrone e un antineutrino, diventando un protone e trasformando l'atomo di carbonio in un atomo di azoto). Non c'è alcun ticchettio: ogni atomo in sostanza se ne sta lì dov'è, affidandosi al caso. Se oggi creassimo un singolo atomo di carbonio-14, ci sarebbe una probabilità del 50 per cento che nel giro di 5730 anni decada trasformandosi in un atomo di azoto. Se fra 5730 anni scopriremmo che non è ancora decaduto, quale sarebbe la probabilità che decada nei 5730 anni successivi? Sempre il 50 per cento. Come le dieci monete lanciate senza

sosta, l'atomo non serba alcuna memoria o traccia del numero di millenni che ha trascorso sfidando il caso.

La possibilità di misurare efficacemente il tempo servendosi del decadimento radioattivo dipende dalle caratteristiche statistiche della popolazione: più il numero iniziale di atomi radioattivi è elevato, più la nostra stima del tempo sarà accurata. Un singolo elemento non fornisce molte informazioni circa la quantità di tempo trascorsa, ma una popolazione crea un metodo attendibile per misurare il tempo. Si noti che questa strategia presenta una certa somiglianza con l'idea che all'interno del cervello vi

siano degli orologi di popolazione, e con l'ipotesi conseguente che il miglior modo per misurare il tempo consista nell'osservare la sottopopolazione di neuroni attiva in un determinato istante.

Calendari

In prevalenza i nostri antenati erano molto più interessati alla misurazione prospettiva del tempo che a quella retrospettiva. Perciò i più antichi tentativi di misurare il tempo furono in primo luogo di tipo calendaristico. Prevedere le fasi lunari, l'arrivo dell'inverno e gli schemi migratori di potenziali prede si rivelò estremamente prezioso ai fini della sopravvivenza. Gli indovini, i sapienti, i sacerdoti-astronomi utilizzavano la luna, le stelle e i ritmi naturali degli animali e delle piante – oltre che un'abbondante dose di superstizione – per individuare il giorno più propizio per iniziare una guerra, per

seminare e raccogliere, per compiere cerimonie religiose, per celebrare matrimoni e dare sepoltura ai morti. Tutto ciò conferiva loro potere e, naturalmente, dove c'è potere c'è anche abuso di potere. I sacerdoti romani che controllavano il calendario a quanto pare non si facevano scrupoli a sfruttare il proprio incarico per accorciare la durata del mandato dei politici che erano loro sgraditi. Secondo David Ewing Duncan, «l'iperpoliticizzato collegio dei sacerdoti a volte allungava la durata dell'anno per mantenere in carica più a lungo consoli e senatori a esso graditi, o la riduceva per abbreviare il mandato dei politici

rivali».³

Non sorprende che i primi tentativi di prevedere il cambio delle stagioni si siano basati sui due corpi celesti più visibili. Sfortunatamente però il Sole e la Luna seguono tabelle di marcia diverse. Per millenni i custodi del tempo si scontrarono con la fastidiosa circostanza che l'anno solare non è perfettamente divisibile per la durata dei mesi lunari: la Terra impiega infatti 365 giorni e $\frac{1}{4}$ per compiere un giro completo intorno al Sole (anche se per gran parte della storia umana si è pensato che fosse il Sole a girare intorno al nostro pianeta), e la Luna impiega, in media, 29,53 giorni per completare la

sua orbita intorno alla Terra. Pertanto in un anno solare ci sono 12,4 mesi lunari. Nel v secolo a.C. i Babilonesi ebbero la pensata di istituire un ciclo di 19 anni , comprendente 7 anni di 13 mesi e 12 anni di 12 mesi. Gli egizi e i romani decisero saggiamente di evitare di usare i cicli lunari per misurare il ritmo delle stagioni e la durata dell'anno. Ma rimaneva una sfida: un anno solare non contiene un numero intero di giorni. In altre termini, il tempo che la Terra impiega per girare intorno al proprio asse non è un sottomultiplo del tempo che impiega a ruotare intorno al Sole. Se supponessimo che l'anno è composto da 365 giorni, fra cento anni le vacanze estive comincerebbero con 25 giorni di

anticipo.

Per raggiungere qualche forma di accordo fra giorni e anni Giulio Cesare riunì matematici, filosofi e astronomi. Il risultato fu l'invenzione dell'anno bisestile. Il calendario giuliano è composto da 12 mesi e 365 giorni, e da un anno bisestile di 366 giorni che cade ogni 4 anni. In onore di Giulio Cesare uno dei 12 mesi fu chiamato Julius (luglio). Pur risultando una pietra miliare della storia umana, il calendario giuliano non era perfetto. Occorreva un'ulteriore messa a punto. Col passare dei secoli l'anno calendariale si disallineò infatti da quello solare, poiché in un anno i giorni non sono

esattamente $365 \text{ e } 1/4$, bensì circa 365,2425. Per ovviare a questo slittamento, nel 1582 papa Gregorio XIII decretò che gli anni bisestili fossero omessi ogni 100 anni e, inoltre, che questa omissione fosse omessa ogni 400 anni. Oggi continuiamo a utilizzare il calendario gregoriano, ma per tenere conto delle irregolarità della rotazione terrestre abbiamo cominciato a servirci dei secondi bisestili, in modo da mantenere il giorno solare allineato con il Tempo coordinato universale. A partire dal 1972 sono stati furtivamente introdotti nei nostri orologi oltre due dozzine di secondi bisestili.

I primi orologi

I calendari ci sanno dire che giorno è, ma non che ora è. Per individuare l'ora del giorno gli esseri umani, almeno a partire dal quarto millennio a.C., utilizzarono le ombre proiettate dal sole. Le prime meridiane consistevano semplicemente in un bastone verticale infisso nel terreno e circondato da linee che demarcavano l'area dove il sole avrebbe proiettato la propria ombra nel corso della giornata. La maggior parte delle meridiane suddivideva il giorno in dodici intervalli, ma in prevalenza le «ore» in questione non corrispondevano necessariamente a quelle attuali: le «ore» diurne erano infatti 12, che si

trattasse di un giorno estivo con 15 ore di luce oppure di un giorno invernale con 9 ore di luce. Le meridiane in questione misuravano dunque il tempo relativo: col variare delle stagioni le ore si contraevano o si dilatavano.⁴

Si avviò così il passaggio inesorabile dal tempo destrutturato a quello rigidamente disciplinato dall'orologio. All'epoca dell'Impero romano le meridiane erano onnipresenti, ma già nel II secolo a.C. il commediografo latino Plauto aveva messo in bocca a un personaggio la seguente invettiva:

Maledetto chi ha inventato l'orologio
e stramaledetto il primo che ha piazzato
qui la meridiana!

M'ha fatto a pezzettini la giornata, me tapino.

Da ragazzo, la pancia era la sola meridiana, la migliore, senza confronto, e la più esatta di tutte quante.

Quando dava il segnale quella, si poteva mangiare, se mai ce n'era:

adesso, anche quel che c'è non si mangia, se non garba al sole.

Così, ormai, la città trabocca di meridiane...⁵

Esistevano anche altri metodi per misurare il tempo: non orologi veri e propri bensì cronometri. Le clessidre, o orologi ad acqua, misuravano intervalli fissi corrispondenti al tempo che l'acqua passante per un piccolo foro impiegava a riempire o a svuotare un recipiente. E

intorno al XIII secolo comparvero i primi orologi meccanici. A differenza dell'acqua di una clessidra, gli orologi meccanici d'inverno non congelano. E, a differenza delle meridiane, funzionano anche di notte e nei giorni nuvolosi. Ci si potrebbe ragionevolmente domandare – vista l'assenza di voli da prendere, di film da vedere o di cartellini da timbrare – quale fosse l'incentivo a tenere, giorno e notte, un computo preciso del tempo. C'era una cosa che alcune persone, che piovesse o splendesse il sole, erano tenute a fare a intervalli regolari: pregare. I monasteri erano entità sottoposte a regole estremamente rigide, e fra queste vi era l'obbligo, sancito da papa Sabiniano nel

vii secolo, di suonare la campana per chiamare i monaci alla preghiera sette volte al giorno. Così gli orologi divennero «un mezzo non soltanto per tenere il computo delle ore, ma anche per sincronizzare le azioni umane». ⁶ I monasteri e le chiese furono i primi ad adottare la tecnica meccanica per misurare il tempo. Accanto alle chiese crebbero i campanili, e spesso erano i monaci e i sacerdoti a svolgere l'incarico di controllare l'orologio della chiesa e di suonare la campana per annunciare l'ora alla cittadinanza – sempre che non rimanessero addormentati:

Fra Martino, campanaro,
dormi tu? Dormi tu?
Suona le campane, suona le campane,
din don dan, din don dan.⁷

Pendoli

A quanto sembra Galileo fu il primo essere umano ad accorgersi che il tempo che impiega un grave appeso a un filo per compiere un'oscillazione completa è quasi indipendente dall'ampiezza dell'oscillazione. Ma fu solo dopo la morte di Galileo che le sue intuizioni furono applicate alla fabbricazione degli orologi. Mentre Galileo era in vita, tuttavia, le proprietà del pendolo furono utilizzate per creare uno dei primi dispositivi medici fabbricati dall'uomo: il *pulsilogium*. Tale strumento consisteva in un peso legato a un filo fissato a un righello verticale. Il righello permetteva di accorciare o allungare la

lunghezza del filo. Variandone la lunghezza il medico era in grado di regolare il periodo dell'oscillazione del pendolo in modo da sincronizzarlo con i battiti del cuore del paziente. In tal modo la lunghezza del filo forniva una misura piuttosto attendibile del ritmo cardiaco.⁸

Christiaan Huygens fu il primo a sfruttare le intuizioni di Galileo per costruire orologi a pendolo di alta qualità. Essendo un matematico più abile di Galileo, Huygens riuscì a comprendere appieno la complessa dinamica di un grave che oscilla appeso a un filo. Grazie appunto ai suoi talenti matematici, nonché a svariate

innovazioni tecnologiche, l'orologio che progettò nel 1657 rappresentò un balzo epocale nella tecnica della misura del tempo. Prima di lui i migliori orologi sbagliavano di circa 15 minuti al giorno; il suo orologio perdeva solo 10 secondi al giorno.⁹ Dieci secondi equivalgono a circa lo 0,01 per cento di un giorno di 24 ore. Questo livello di accuratezza segnò una pietra miliare nella storia della misurazione del tempo: quelli di Huygens furono infatti i primi orologi progettati dal cervello umano a funzionare meglio degli orologi che si trovano dentro di esso. Come abbiamo visto, l'orologio biologico migliore, l'orologio circadiano che presiede al

nostro ciclo sonno-veglia, ha una precisione dell'1 per cento circa (15 minuti), vale a dire che il periodo di un orologio circadiano il cui periodo medio è di 24 ore fluttua per lo più fra le 23 ore e 45 minuti e le 24 ore e 15 minuti.¹⁰

Gli orologi a pendolo di Huygens non risolsero però quello che è stato probabilmente uno dei problemi scientifici e tecnici più pressanti della storia della civiltà: il problema della longitudine.

Alla fine del xv e all'inizio del xvi secolo gli esploratori europei erano impegnati a percorrere in lungo e in largo gli oceani, a scoprire nuove rotte

commerciali, nuove isole, nuovi continenti, e persino a circumnavigare il pianeta. Passavano tuttavia una quantità eccessiva di tempo persi in mezzo al mare perché non erano in grado di calcolare in maniera affidabile la propria longitudine, cioè la propria posizione lungo l'asse est-ovest. La latitudine poteva essere misurata in maniera abbastanza precisa calcolando l'inclinazione del sole nel suo punto più alto (il mezzogiorno locale), ma non esisteva alcun metodo noto per calcolare con precisione la longitudine basandosi sul sole, sulla luna o sulle stelle. Ciò aveva un profondo impatto economico, in un'epoca in cui il Portogallo, la Spagna, la Francia, l'Inghilterra e

l'Italia erano in competizione per accaparrarsi le ricchezze del Nuovo Mondo. Gli equipaggi venivano decimati dallo scorbuto e dalla fame mentre cercavano la terra, i capitani si arenavano con le loro navi e ricchi tesori finivano in fondo all'oceano. In uno di questi catastrofici incidenti, avvenuto nel 1707, l'ammiraglio britannico sir Cloudisley Shovell si schiantò con la propria flotta contro le isole Shilly. Quattro delle sue cinque navi andarono perdute e circa duemila uomini perirono. Anche in conseguenza di questa tragedia, nel 1714 il Parlamento inglese approvò la Legge sulla longitudine (*Longitude Act*),

offrendo un premio in denaro equivalente a oltre un milione di dollari odierni a chiunque avesse inventato un metodo per calcolare accuratamente la longitudine durante la navigazione.

La longitudine si riferisce alla posizione che occupiamo nello spazio. Ci si potrebbe perciò domandare che cosa abbia a che fare con gli orologi. Dal punto di vista matematico lo spazio è figlio del tempo e della velocità (la distanza è uguale al tempo moltiplicato per la velocità). Qualunque cosa si muova a velocità costante può quindi essere usata per calcolare la distanza, purché si sappia da quanto tempo si sta muovendo. Sono molte le cose dotate di velocità costante, fra le quali la luce, il

suono e la rotazione terrestre. Il nostro cervello sfrutta la quasi costanza della velocità del suono per calcolare da dove provengono i suoni: come abbiamo visto, capiamo se chi ci parla è alla nostra destra o alla nostra sinistra perché il suono della sua voce impiega approssimativamente 0,6 millisecondi per percorrere la distanza che separa il nostro orecchio destro da quello sinistro. Tenendo conto del tempo che un suono impiega per arrivare a ciascuna delle nostre orecchie, il cervello è in grado di capire se la voce arriva direttamente da destra, direttamente da sinistra, oppure da qualche punto intermedio.

La Terra ruota a velocità costante, una velocità che le fa compiere una rotazione completa (360 gradi) ogni 24 ore. Esiste perciò una corrispondenza diretta fra gradi di longitudine e tempo. Sapere quanto tempo è trascorso equivale a sapere di quanto la Terra ha girato: se rimanete seduti a leggere questo libro per un'ora ($1/24$ di un giorno), la Terra nel frattempo ha ruotato di 15 gradi ($360/24$). Se dunque vi trovate in mezzo all'oceano al mezzogiorno locale, e sapete che a Greenwich sono le 16:00, ciò significa che vi trovate «a 4 ore da Greenwich», cioè a 60 gradi esatti di longitudine da Greenwich. Problema risolto. Tutto

quello che occorre è un *cronometro marino* davvero efficiente.

Le menti più grandi del XVII e del XVIII secolo non poterono ignorare il problema della longitudine: vi dedicarono la loro attenzione Galileo Galilei, Blaise Pascal, Robert Hooke, Christiaan Huygens, Gottfried Leibniz e Isaac Newton. Alla fine, però, non fu un grande scienziato bensì uno degli artigiani più eminenti al mondo a vincere (benché ufficiosamente) il Premio della Longitudine. John Harrison (1693-1776) era un orologiaio autodidatta la cui ossessiva capacità di applicazione raggiungeva il parossismo.

Harrison e altri avevano chiaro in mente che, se gli orologi dovevano

risolvere il problema della longitudine, occorreva che fossero azionati meccanicamente da molle metalliche oscillanti (le molle del bilanciere). In navigazione un pendolo è inservibile perché il movimento dello scafo ne perturba gravemente il moto oscillatorio. Inoltre le fluttuazioni della temperatura, a terra come in mare, alterano la lunghezza dell'asta di metallo che sostiene il peso (la lente) del pendolo. Di fatto le variazioni della temperatura pongono una delle sfide più ardue agli orologi ad alta prestazione, siano essi fabbricati dall'uomo oppure biologici. Nel corso del tempo gli orologiai e l'evoluzione si sono perciò

trovati di fronte al problema di creare orologi invarianti rispetto ai cambiamenti di temperatura. Una delle prime invenzioni di John Harrison fu il pendolo a griglia, in cui la lente era sostenuta da un insieme di aste fatte di metalli differenti e fissate in direzione opposta. Il risultato era che gli incrementi di lunghezza prodotti dalla variazione della temperatura nelle aste contrapposte si controbilanciavano, mantenendo costante la lunghezza complessiva del pendolo. La specialità di Harrison, tuttavia, erano gli orologi meccanici, per i quali inventò la *lamina bimetallica*, in cui venivano congiunte lamine di due metalli diversi, ciascuno caratterizzato da un diverso coefficiente

di espansione della temperatura. Grazie a ciò queste lamine potevano essere impiegate per far sì che le molle del bilanciere mantenessero un periodo costante a prescindere dalla temperatura.

Grazie a parecchie innovazioni di questo tipo, e alla sua superba abilità di artigiano, Harrison riuscì a costruire il primo cronometro marino rispondente ai criteri di accuratezza richiesti dalla Commissione della Longitudine. La soluzione al problema della longitudine stabilì un precedente per un principio tecnologico destinato a godere di grande fortuna e così sintetizzabile: lo strumento migliore per misurare lo

spazio è l'orologio. [11](#)

Il quarzo e il cesio

Harrison e altri maestri orologiai diedero avvio a oltre un secolo di graduali e costanti progressi nella misura del tempo meccanico. Ma tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo dalle riforme si passò alla rivoluzione. Con il diffondersi di orologi che perdevano meno di un secondo al giorno crebbe via via l'esigenza di sincronizzarli. Il problema di accertare se due orologi distanti fra loro concordassero era complicato: come stabilire se una sveglia situata a Parigi e una situata a Berna suonano esattamente nello stesso istante? La soluzione provenne da due tecnologie emergenti: l'elettrotecnica e

la radiotecnica. All'inizio del Novecento l'attenzione si appuntò sull'*elettrocoordinazione*, cioè sull'uso dell'elettricità per inviare segnali dotati di ritardi trascurabili da un orologio principale a orologi secondari situati in altri luoghi. Lungi dall'essere un'astrusa questione accademica, lo studio della coordinazione del tempo traeva diretto impulso dal settore ferroviario, da quello della telegrafia e dalla finanza. E, come accade per la maggior parte delle questioni pratiche, gli inventori cercavano di brevettare le proprie invenzioni in materia. Essendo la Svizzera un punto nevralgico della tecnologia legata al tempo, molte di queste richieste di brevetto erano

presentate all'Ufficio dei brevetti di Berna. Qui, dal 1902 al 1909, un funzionario che le cronache definiscono solerte esaminò ogni genere di richieste brevettuali, alcune delle quali relative all'elettrocoordinazione degli orologi. Nel 1905 il funzionario in questione, Albert Einstein, pubblicò la memoria *L'elettrodinamica dei corpi in movimento*, che, oltre ad abolire la nozione di tempo assoluto, presentava succintamente un metodo per sincronizzare orologi distanti fra loro.^{[12](#)}

Ritorniamo alle implicazioni del lavoro di Einstein nel prossimo capitolo. Per ora focalizzeremo la nostra attenzione sul fatto che, all'inizio del xx

secolo, dopo secoli di progressi, gli orologi a pendolo e quelli meccanici stavano per diventare obsoleti, almeno come strumenti di misura del tempo avanzati. L'invenzione degli orologi a cristallo di quarzo risale agli anni venti di quel secolo, e due decenni dopo furono costruiti i primi orologi atomici.

L'accuratezza di un orologio dipende dalla sua *base del tempo*. La base del tempo di un orologio a pendolo è, ebbene sì, il pendolo. La base del tempo di un orologio al quarzo è, come ci si aspetterebbe, un piccolo cristallo di quarzo. Quando gli si applica una tensione elettrica, il cristallo di quarzo oscilla ad alta frequenza. La frequenza dell'oscillazione dipende da molti

fattori, fra cui il tipo e la forma del cristallo, ma generalmente i cristalli di quarzo degli orologi digitali oscillano a 32 768 Hz (2^1 , una cifra comoda da maneggiare, equivalente a 1 000 000 000 000 000 in notazione binaria). Le oscillazioni sono contate mediante un circuito digitale che marca ogni secondo che passa.

Al giorno d'oggi anche gli orologi al quarzo a basso costo hanno prestazioni superiori a quelle dei migliori orologi meccanici. Ciononostante, per le misure di precisione ci si affida agli orologi atomici, il cui grado di accuratezza sarebbe apparso impensabile a Huygens o a Harrison: mentre l'orologio a

pendolo di Huygens perdeva 10 secondi al giorno, un orologio atomico potrebbe accumulare lo stesso ritardo nell'arco di 4,5 miliardi di anni, cioè il tempo trascorso da quando la Terra si è formata.[13](#)

La base del tempo di un orologio atomico è un po' ardua da visualizzare. Atomi come il cesio possiedono una *frequenza di risonanza*, corrispondente alla frequenza della radiazione elettromagnetica che li fa «vibrare», cioè che fa sì che un elettrone che «orbita» intorno al nucleo salti a un livello energetico superiore. L'isotopo cesio-133 risuona quando è stimolato da una radiazione a microonde all'esatta

frequenza di 9 192 631 770 Hz. In un certo senso è la frequenza di questa radiazione che serve da base del tempo degli orologi atomici, e gli atomi di cesio svolgono il ruolo di calibratori, procurando che la frequenza sia corretta. Nel 1967 una conferenza internazionale definì il secondo come *«la durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione fra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio-133»*.¹⁴ L'unità di tempo fondamentale si separò così definitivamente dalla dinamica osservabile dei pianeti e fu collocata nell'impercettibile sfera di azione di un singolo elemento chimico.

Come gli orologi più avanzati del Settecento e dell'Ottocento rivoluzionarono la navigazione marittima, gli orologi atomici hanno rivoluzionato la navigazione nell'era dell'informazione. Il GPS individua la distanza fra almeno quattro satelliti e il ricevitore (si tratti del vostro smartphone o di una testata di missile) situato sulla Terra. Per raggiungervi, un segnale che viaggia alla velocità della luce e che proviene da un satellite distante 20 000 km impiega circa 66 millisecondi. Se vi allontanate di altri 10 metri dal satellite, il segnale impiegherà 33 nanosecondi (0,000000033) in più. I ricevitori GPS

devono riuscire a cogliere questi minuscoli scarti fra il momento della trasmissione e quello dell'arrivo del segnale. Per farlo, il sistema GPS comporta non solo l'invio nello spazio di un gran numero di satelliti, ma la presenza di un orologio atomico in ciascuno di essi (un meraviglioso servizio pubblico offerto dai contribuenti americani e dalle forze armate degli Stati Uniti). Misurando le differenze di tempo che un segnale impiega ad arrivare da satelliti diversi, un ricevitore GPS è in grado di compiere una sorta di triangolazione in modo da calcolare le proprie coordinate spaziali: latitudine, longitudine e altitudine.¹⁵ Gli

odierni orologi atomici e satelliti GPS avrebbero potuto indicare a sir Clowdisley Shovell non solo la posizione della sua nave, ma la sua posizione all'interno della nave.

Il tempo in vendita

I nostri orologi sbalorditivamente precisi furono impiegati non solo per misurare lo scorrere asettico delle ore e dei secondi, ma anche per misurare l'uso che concretamente facciamo del tempo. La diffusa disponibilità degli orologi di precisione creò le premesse per l'introduzione della paga oraria. Verso la fine dell'Ottocento un uomo di nome Willard Bundy intuì l'importanza di calcolare e di registrare il tempo di lavoro degli operai delle fabbriche, inventando un metodo per rilevarne l'ora di entrata e di uscita: nacquero gli orologi marcatempo. L'azienda fondata da Bundy, l'International Time

Recording Company, si fuse nel 1911 con altre società dando vita alla Computing Tabulating Recording Company, in seguito ribattezzata International Business Machines (IBM).¹⁶

Quando Benjamin Franklin scriveva che «*il tempo è denaro*» si riferiva al salario giornaliero: un giorno di ozio è denaro perso sotto forma di entrate mancate. *Il tempo è denaro* è esponenzialmente ancor più vero oggi. I trader che operano sui mercati azionari possono ricavare lauti profitti sfruttando vantaggi temporali di millesimi di secondo. E persino il semplice gesto di guardare la TV è una forma di transazione temporal-monetaria. I telespettatori

cedono infatti il tempo che passano a fare qualcosa che non vorrebbero fare – guardare la pubblicità – in cambio di intrattenimento «gratuito» (pagato dai susseguenti acquisti). Nel caso di alcuni servizi di musica e di video sul web possiamo “riacquistare il nostro tempo” pagando una tariffa per non essere assoggettati alla pubblicità.

Il sociologo Lewis Mumford ha affermato che *«è l'orologio, non il motore a vapore, la macchina cruciale della moderna età industriale»*.¹⁷ Se è stato la macchina cruciale dell'era industriale, l'orologio rimane una macchina cruciale anche nell'era dell'informazione. Gli orologi

scompongono le nostre esistenze in unità sempre più piccole. Le riunioni di lavoro sono tarate al minuto; nello speed-dating ciascun «appuntamento» dura tre minuti; e limare una frazione di secondo dalla durata del giallo del semaforo può suscitare proteste popolari legate all'aumento delle multe per mancato rispetto del rosso.¹⁸ Ma, soprattutto, senza i moderni orologi la macchina quintessenziale dell'era dell'informazione, il computer, non esisterebbe. Oltre a sincronizzare le azioni degli esseri umani, gli orologi regolano infatti il ritmo dei miliardi di operazioni che un computer esegue ogni secondo.

La lotta ingaggiata dall'uomo per riuscire a misurare il tempo ha avuto, in un certo senso, un esito fin troppo favorevole. Secoli fa gli orologi concordavano raramente fra di loro. Oggi siamo tornati al punto di partenza, non perché gli orologi siano imprecisi, ma perché sono eccessivamente precisi. La teoria della relatività generale di Einstein prescrive che il tempo, misurato da un orologio qualsiasi, sia soggetto alla forza di gravità. Pertanto, una volta lanciato nello spazio a bordo di un satellite GPS, un orologio atomico ticchetterà più velocemente (un effetto che occorre tenere in considerazione se si vuole che il GPS funzioni).

Addirittura, le misure fornite da due orologi atomici ottici di ultima concezione differiranno fra di loro se uno dei due orologi viene collocato sul pavimento e l'altro su un tavolo. Quale dei due indica il tempo effettivo? Vedremo più avanti che la domanda è di per sé scorretta.

Oggi riusciamo a misurare il tempo con una precisione maggiore di quella con cui siamo in grado di misurare qualunque altra grandezza. Di fatto lo spazio è stato sussunto dal tempo: il metro si definisce come la distanza che la luce percorre in $1/299\,792\,458$ di secondo.¹⁹ Ma non sono solo la risoluzione e l'accuratezza degli orologi

moderni a essere strabilianti: lo è anche il loro raggio di applicazione. Per misurare il peso di un granello di sale, di un essere umano e di un autocarro abbiamo bisogno di tre tipi di bilancia molto diversi. Viceversa, un orologio atomico può essere usato per misurare i nanosecondi di ritardo dei segnali radio provenienti dai satelliti GPS tanto quanto la durata dell'orbita terrestre intorno al Sole, nonché per aggiungere al momento opportuno un secondo bisestile quando la Terra sta rallentando (la rotazione terrestre può manifestare delle irregolarità a causa di eventi geologici e climatici). Nessun congegno ideato, e tanto meno fabbricato, dall'uomo possiede la precisione o l'estensione

d'uso degli orologi moderni. Ma, nonostante queste prodezze tecniche, bisogna constatare che la nostra capacità di misurare il tempo non ci ha molto aiutato a comprendere la *natura* del tempo. Perché il tempo scorre in una sola direzione? Il passato e il futuro sono intrinsecamente diversi dal presente? O così appare in virtù di un inganno generato dal cervello umano? Sono queste le domande che affronteremo nei prossimi capitoli.

8:00

Il tempo: che diavolo è?

Fra tutti gli ostacoli che si frappongono a una spiegazione radicale dell'esistenza, nessuno genera più sgomento del tempo. Spiegare il tempo? Non senza aver spiegato l'esistenza. Spiegare l'esistenza? Non senza aver spiegato il tempo. Scoprire il profondo e nascosto legame che sussiste fra il tempo e l'esistenza [...] è un compito riservato al futuro.

John Wheeler

Il cervello umano ha escogitato il modo per costruire gli orologi atomici, per scindere l'atomo, per compiere viaggi di andata e ritorno sulla luna, per

trapiantare organi e geni da una creatura all'altra, e ha persino iniziato a decifrare i propri meccanismi interni. Questi spettacolari risultati ci inducono talvolta a dimenticare che siamo soltanto scimmie insolitamente intelligenti.

Il cervello è un prodotto dei principi piuttosto accidentali seguiti dal «progetto» evolutivo. Per gran parte degli ultimi 70 milioni di anni circa, l'evoluzione ha plasmato il cervello dei primati rendendoli capaci di utilizzare abilmente i pollici opponibili, di riconoscere gli oggetti, di individuarsi vicendevolmente e di sviluppare abilità e legami sociali che in ultima istanza ne hanno allungato la sopravvivenza e ne hanno migliorato la riproduzione.

Appare sensato affermare che, nel corso di questo processo, la pressione selettiva a imparare a leggere o a dedurre il teorema di Pitagora sia stata scarsa. Il fatto che siamo capaci di svolgere simili attività è una prova dell'ampiezza delle capacità computazionali del cervello umano. Eppure il cervello possiede un'abbondanza di «buchi», di limiti e di bias connaturati. Come esempio a caso di un compito che il cervello esegue male, provate ad aggiungere mentalmente i numeri seguenti:

$$1000 +$$

$$40 +$$

$$1000 +$$

30 +
1000 +
20 +
1000 +
10

Il più delle volte la risposta che viene fornita è 5000, anziché quella corretta (4100). Come mai il cervello è così inefficiente nel compiere semplici calcoli numerici quando, sotto tutti i punti di vista, riconoscere un volto o leggere questa frase sono compiti computazionali di gran lunga più complessi? La risposta usuale, ma parziale, a questa domanda è che vi è stata una scarsa pressione selettiva a eseguire calcoli numerici. La risposta

completa va un po' più in profondità. Gli elementi costitutivi di qualunque apparato computazionale – sia esso il cervello o un computer digitale – determinano quali compiti esso è ben adatto (o poco adatto) a svolgere. Nessun essere umano riuscirà mai a eseguire lunghe divisioni meglio di quanto sappia fare il calcolatore più semplice, perché i neuroni sono elementi computazionali lenti e «rumorosi», privi della velocità e delle caratteristiche «a interruttore» dei transistor che compongono i nostri computer digitali.¹

Eseguire calcoli numerici, memorizzare sequenze casuali di parole o intuire rapidamente la probabilità che

lanciando quattro monete escano due teste e due croci sono alcuni dei tipi di compito che il cervello è scarsamente predisposto a svolgere. Alla luce di ciò, probabilmente, dovremmo anche domandarci in che misura i limiti e i bias connaturati al cervello vincolino il progresso della scienza. In quale modo l'architettura del cervello condiziona la nostra capacità di rispondere a domande che l'evoluzione non ci ha attrezzato ad affrontare? Fra le molte cose che certamente l'evoluzione non ha attrezzato il cervello a comprendere c'è il cervello stesso. Un'altra è la natura del tempo.

Il presentismo e l'eternalismo rivisitati

Gli esseri umani hanno intrapreso una lunga e impegnativa ricerca intesa a misurare il tempo in modo sempre più preciso. Come abbiamo visto nel capitolo precedente, si è trattato di una ricerca coronata da un successo inimmaginabile, ma il successo ottenuto nel misurare il tempo meccanico non ha prodotto un accordo su *che cosa* esattamente stiamo misurando.

Che cos'è il tempo? Non mi riferisco a *l tempo meccanico* né al *tempo soggettivo*, ma alla parola *tempo* nel suo senso forse più profondo: alla natura del tempo. A questo proposito i filosofi e i

fisici propongono molte teorie differenti.² Alcune di esse sono incompatibili fra loro, altre sono sottili variazioni sullo stesso tema. Ma, come abbiamo visto nel [Capitolo 1](#), per i nostri scopi possiamo riferirci al *presentismo* e all'*eternalismo* come alle due concezioni principali.

A mo' di ripasso, secondo il *presentismo* solo il presente è reale: tutto ciò che esiste esiste nel perpetuo presente (nell'uso che faccio di questo termine, il presentismo non implica che il tempo sia assoluto). Il passato si riferisce a una configurazione dell'universo non più esistente, mentre il futuro rappresenta una configurazione

ancora da determinare. Nell'*eternalismo* il tempo è *spazializzato* e diviene a tutti gli effetti una dimensione nella quale il passato, il presente e il futuro sono ugualmente reali. L'universo si trasforma così in un «blocco» quadridimensionale dotato di tre dimensioni spaziali e di una dimensione temporale: il cosiddetto *universo-blocco*.³

Il linguaggio pone un ostacolo atavico alla possibilità di discutere presentismo ed eternalismo senza incorrere in ambiguità. Per esempio, vocaboli come «reale» ed «esiste» possono assumere significati molto diversi a seconda che si adotti una

prospettiva presentista o eternalista. Nell'ottica del presentismo l'enunciato «*i dinosauri esistono*» è falso. Ma dal punto di vista dell'eternalismo si potrebbe sostenere che è vero, dato che i dinosauri effettivamente esistono in un altro momento del tempo, un momento che è reale tanto quanto il momento che consideriamo essere *adesso*. Perciò, anziché provare a definire il presentismo e l'eternalismo mediante parole come *reale* ed *esiste*, ci converrà definire *esiste* e *reale* in base al presentismo o all'eternalismo. Nell'ambito del presentismo, *reale* significa *che esiste adesso* e solo *adesso*, poiché il presente è l'unico momento in cui qualcosa può esistere.

Viceversa, per un eternalista *reale* indica qualcosa, compresi i dinosauri e i nostri futuri discendenti, che *esiste* ovunque/in qualunque momento all'interno dell'intero universo-blocco.

Il linguaggio assume una prospettiva intrinsecamente presentista. Come nel presentismo, nella coniugazione verbale il presente costituisce un sistema di riferimento privilegiato. I termini *presentismo* e *d'eternalismo* sono in relazione con ciò che alcuni filosofi chiamano, rispettivamente, tempo tensionale (*tensed*) e tempo atensionale (*untensed*).⁴ Il tempo tensionale è sempre ancorato al presente: la frase «Sono andato in palestra questa mattina

e ieri mattina» definisce gli eventi passati in relazione al presente. L'enunciato è vero oggi, ma (fidatevi) non sarà vero domani, e certamente non era vero cento anni fa. Viceversa, un arido inventario dei fatti come «1 gennaio 2016, ore 8: in palestra; 2 gennaio 2016, ore 8: in palestra» è un esempio di tempo atensionale. Se questo elenco è vero oggi rimarrà vero anche domani, e in un certo senso sarebbe risultato vero anche cento anni fa. Gli eventi paiono coesistere lungo un *continuum*, analogamente ai quadrati consecutivi che rappresentano giorni «adiacenti» su un calendario. È come se il tempo fosse stato spazializzato.

Il tempo: ne abbiamo bisogno?

Esistono teorie sulla natura del tempo che non sono pienamente riconducibili né al presentismo né all'eternalismo. Il fisico George Ellis, per esempio, è fra coloro che propugnano un compromesso: un universo-blocco quadridimensionale che contiene solo il passato. In questa cosiddetta teoria dell'*universo-blocco in evoluzione* (*evolving block universe*), il presente è il fronte d'onda che congela progressivamente un futuro indeterminato trasformandolo in un passato immutabile in continua accumulazione.⁵

Altri reputano che il tempo sia una

pura astrazione, un concetto utilissimo per contribuire a spiegare il funzionamento dell'universo, ma che non sia, a differenza della massa e dell'energia, un ingrediente fondamentale della fisica. Per comprendere un po' meglio questa concezione si ricordi che, in pratica, il tempo meccanico è sempre misurato dal mutamento. A prescindere dalla loro maggiore o minore precisione, gli orologi quantificano sempre la variazione di qualche fenomeno fisico. Da ciò discende che è sempre possibile esprimere il tempo tramite qualche altra misura fisica non temporale. Ad esempio, gli orologi al quarzo da parete o da polso spesso segnano il tempo su

quadranti circolari, e quando la loro lancetta dei minuti si sposta da 12 a 6 diciamo che sono passati 30 minuti; ma non potremmo invece dire che sono passati 180 gradi? Oppure, nel caso di un orologio a pendolo con una frequenza di base di 1 Hz, invece di affermare che sono passati 30 minuti potremmo dire che sono trascorse 1800 oscillazioni. L'unità di tempo elementare (il secondo) non è definita come un'unità pura di tempo, bensì come 9 192 631 770 cicli della radiazione corrispondente alla frequenza di risonanza del cesio-133, una grandezza all'incirca equivalente all'intervallo impiegato dalla Terra per girare di $1/240$ di grado intorno al

proprio asse. Centoventisei di questi secondi corrispondono alla quantità di tempo impiegata dai discesiisti per spostare la propria posizione dal cancelletto di partenza alla linea del traguardo in occasione delle Olimpiadi invernali del 2014. Il punto è che il tempo meccanico può essere considerato una convenzione con la quale standardizzare il cambiamento. Il tempo offre un metodo incredibilmente utile per stabilire relazioni di equivalenza fra i tassi di cambiamento di sistemi fisici diversi (i sostenitori di questa concezione sono talora detti *relazionalisti*). Come affermò il fisico Ernst Mach nel XIX secolo: «Esula completamente dal nostro potere

misurare i mutamenti delle cose mediante il tempo. Tutto all'opposto, il tempo è un'astrazione, alla quale giungiamo per mezzo dei mutamenti delle cose». [6](#)

L'idea che il tempo sia una misura della variazione dello stato dei sistemi fisici era implicita nei capitoli che abbiamo dedicato al modo in cui il cervello misura il tempo. Abbiamo visto infatti che, come siamo in grado di adibire a cronometro le onde create da una goccia di pioggia caduta in uno stagno, il cervello può utilizzare la dinamica delle reti neurali per stabilire correlazioni fra gli stati interni della rete e i mutamenti che hanno luogo nel

mondo esterno. Così il compito di battere il dito una volta al secondo equivale in ultima analisi ad abbinare i mutamenti interni al proprio cervello ai mutamenti di un orologio fabbricato dall'uomo. Alla fine questo è in sostanza tutto ciò che intendiamo dire quando affermiamo che il cervello sta misurando il tempo.⁷

Il guazzabuglio di termini e di teorie riguardanti il tempo – presentismo, eternalismo, tempo tensionale, tempo atensionale, universo-blocco in evoluzione, relazionalismo ecc. – è un sintomo del fatto che non c'è accordo su che cosa sia effettivamente il tempo. Ad ogni buon conto, se vi è una teoria

preferita in fisica e in filosofia, questa è certamente l'eternalismo. Tuttavia l'eternalismo non solo è controintuitivo, ma si fa beffe di uno degli aspetti più universali dell'esperienza umana: la sensazione che il presente sia l'interfaccia fra un passato che non esiste più e un futuro aperto ancora di là da essere. L'eternalismo, affermando che tutti i momenti del tempo sono reali quanto tutti i luoghi dello spazio, non si accorda con la nostra sensazione soggettiva che il tempo scorre. Dunque i fisici e i filosofi devono avere ottime ragioni per aderire all'eternalismo. In questo e nel prossimo capitolo esamineremo due di queste ragioni. Eccone un'anteprima: 1) in base alle

leggi della fisica, l'*adesso* è un momento arbitrario del tempo tanto quanto il *qui* è un punto arbitrario dello spazio; 2) la teoria della relatività ristretta di Einstein sembra comportare che tutti i momenti del tempo siano permanentemente disposti lungo la dimensione temporale dell'universo-blocco.

Agnostici riguardo al presente

L'essere riusciti a ricavare le regole fondamentali dell'universo è forse il risultato intellettuale più alto raggiunto dalla specie umana. Le leggi fisiche sono così potenti da aver spodestato gli dei dal ruolo di origine delle risposte alle domande che tormentavano i primi esseri umani. Che cosa sono quei punti luminosi incastonati nel cielo notturno? Perché il sole sorge e tramonta? Le eclissi, i disastri naturali e i capricci del tempo atmosferico non sono più attribuiti alle migliaia di divinità che abbiamo venerato nel corso dei millenni.

Newton fece il primo passo.

Descrisse le leggi che governano il comportamento degli oggetti che abitano la nostra realtà quotidiana, dalle mele che cadono ai pianeti. Einstein, con le teorie della relatività ristretta e della relatività generale, ampliò (e corresse) le leggi di Newton. Einstein ci ha fornito gli strumenti che ci mettono in grado di decifrare gli eventi cosmici successivi al Big Bang, di capire che lo spazio e il tempo non sono indipendenti, e di spiegare la gravità come curvatura dello spaziotempo anziché come forza a sé stante. A differenza dei pianeti e delle stelle, le particelle subatomiche sembravano però seguire regole proprie, che sfidavano le leggi di Einstein. Nel corso dei primi decenni del xx secolo la

meccanica quantistica decodificò queste regole. È in questo sinistro mondo dei quanti che le particelle si trovano in stati sovrapposti (occupando, così sembrerebbe, molteplici punti dello spazio nel medesimo istante) e che particelle correlate (*entangled*) paiono influenzarsi a vicenda in maniera istantanea, anche se sono distanti anni luce l'una dall'altra.

Ma nonostante il loro sbalorditivo successo e il loro impatto rivoluzionario sulle nostre esistenze, le leggi della fisica manifestano un'imbarazzante inadeguatezza quando si tratta di spiegare quella che è forse la constatazione più replicabile mai fatta

dagli esseri umani: il presente è speciale. Come spiega il filosofo contemporaneo Craig Callender: «Le equazioni della fisica non ci dicono quali eventi si stanno verificando *adesso*: sono come una mappa priva del simbolo “Voi siete qui”. In esse il momento presente non esiste, e di conseguenza neppure lo scorrere del tempo».⁸

Le leggi fondamentali della fisica inoltre non ci dicono nulla sulle ragioni per cui il tempo appare così impegnato a muoversi in avanti. Per le equazioni scritte da Newton e da Einstein, per quelle che descrivono l'elettricità e il magnetismo (le equazioni di Maxwell) e

per l'equazione che descrive il mondo dei quanti (l'equazione di Schrödinger) è indifferente se gli eventi si svolgono in avanti o all'indietro.⁹ Di tali equazioni si dice che sono *temporalmente simmetriche*, cioè che – come andare da Los Angeles a San Francisco è un proposito realistico quanto andare da San Francisco a Los Angeles – le leggi di Newton sono applicabili a eventi che si svolgono sia in avanti che a ritroso. Immaginate che vi sia mostrato un filmato della meravigliosa danza che la luna intreccia intorno alla Terra mentre quest'ultima gira intorno al sole. È possibile servirsi delle leggi di Newton per descrivere questa danza con

strumenti matematici. In altre parole, possiamo scrivere un insieme di equazioni capaci di simulare il moto di questi tre corpi celesti. Supponiamo ora che, dopo averlo fatto, ci venga detto che il filmato sul quale ci siamo basati per ricavare le nostre equazioni è stato erroneamente proiettato al contrario. Dovremmo buttare via tutto il nostro lavoro? No. Le nostre equazioni sarebbero ancora valide: tutto ciò che dovremmo fare è invertire il segno della variabile t per rendere conto della direzione effettiva delle orbite.¹⁰ Analogamente, se scopriremo che il filmato risale a cento anni fa, le nostre equazioni sarebbero ancora una volta

pienamente valide. Le leggi di Newton sono agnostiche riguardo alla direzione del tempo come lo sono riguardo al passato, al presente e al futuro. E lo stesso vale per le equazioni della relatività e della meccanica quantistica. Le leggi fisiche non assegnano un significato speciale alla direzione del tempo, o a un qualsiasi momento specifico del tempo: il passato, il presente e il futuro sono tutti sullo stesso piano.

La freccia testarda del tempo

Però potreste pensare: Certo, è comprensibile che le equazioni che governano la dinamica dei pianeti possano procedere in una direzione o nell'altra: in fin dei conti un filmato delle orbite dei pianeti appare ugualmente verosimile sia che lo si proietti nella direzione corretta sia che lo si proietti riavvolgendo il nastro. Ma di sicuro le leggi fisiche proibiscono quelle cose che so per esperienza essere impossibili. I palloncini scoppiati non si rigonfiano, i bicchieri rotti non si ricompongono e i cubetti di ghiaccio del mio tè ghiacciato non si risolidificano. È

presumibile che le leggi della fisica facciano in modo che simili cose non avvengano! Sorprendentemente, non è così.

La soluzione classica del mistero della freccia del tempo fu ideata nel XIX secolo dal fisico austriaco Ludwig Boltzmann. La sua interpretazione statistica del Secondo principio della termodinamica asserisce che l'entropia di un sistema isolato tende inesorabilmente a crescere col passare del tempo. Possiamo concepire l'entropia come una grandezza equivalente al grado di disordine. Se per esempio gettassimo dieci dadi in una scatola e poi la scuotessimo, la posizione dei dadi risulterebbe essere

disordinata o «casualoide», per cui potremmo dire che la scatola si trova in una condizione di elevata entropia. Ma se invece ponessimo con cura i dieci dadi uno sopra l'altro in modo da formare una colonna, potremmo dire che il sistema possiede una configurazione estremamente ordinata, cioè che è in una condizione di bassa entropia.

Per capire con esattezza qual è la relazione fra entropia e freccia del tempo, cominciamo col porre due atomi di idrogeno nella metà sinistra di una scatola. Dopo un po' ritorniamo dalla nostra scatola e domandiamoci: *qual è la disposizione più probabile dei due atomi in termini di collocazione a*

destra o a sinistra? I possibili stati (le configurazioni) in cui possiamo trovare la scatola sono tre: entrambi gli atomi a sinistra (SS), entrambi gli atomi a destra (DD), o uno in ciascuna metà della scatola (dato che gli atomi non sono distinguibili l'uno dall'altro, gli stati SD e DS sono un unico stato). La probabilità di ciascuno di questi stati è $\frac{1}{4}$ SS, $\frac{1}{4}$ DD e $\frac{1}{2}$ SD (DS). Perciò lo stato più probabile è quello in cui gli atomi sono equamente divisi, perché ci sono due modi diversi per ottenere questo risultato. Se sbirciamo di nuovo nella scatola dopo aver osservato tale stato equamente diviso, la probabilità che il sistema sia "risalito" alla propria condizione originaria nella quale

entrambi gli atomi si trovavano a sinistra è piuttosto elevata: $\frac{1}{4}$. Se l'intero universo consistesse in questa scatola, potremmo affermare che esso è tornato indietro nel tempo, cioè che è ritornato a uno stato indistinguibile dal proprio stato iniziale (almeno a questo livello grossolano di analisi, nel quale non ci interessa la posizione precisa degli atomi).

Ma se invece liberassimo nella metà sinistra della scatola 10 000 atomi di idrogeno (una quantità di atomi comunque minuscola) e aspettassimo che il sistema raggiunga uno stato nel quale ciascuna metà della scatola contiene circa la metà degli atomi, la probabilità

che tutti gli atomi situati a destra ritornino a sinistra è incredibilmente piccola: molto, molto più bassa di uno diviso per un googol (un googol è pari a 10^{100} , un numero maggiore di quello delle particelle che compongono l'universo). Perciò, quando diciamo che è improbabile che gli atomi della scatola ritornino al loro stato originario, non stiamo parlando di improbabilità-da-vincita-alla-lotteria, e neppure di improbabilità-da-vincita-alla-lotteria-tutte-le-settimane-per-un-mese. Stiamo parlando di improbabilità-da-vincita-alla-lotteria-tutte-le-settimane-per-un-mese-con-biglietti-che-ogni-settimana-mi-entrano-in-salotto-portati-dal-vento

(a dire il vero non ho alcuna idea di come calcolare questa probabilità; il punto è che un simile insieme di eventi non si verificherà). L'affermazione secondo cui è straordinariamente improbabile che gli atomi della scatola ritornino al loro stato originario è di importanza capitale, perché le si può assegnare il significato che gli atomi della scatola non «viaggeranno all'indietro» nel tempo. Disponiamo dunque di una freccia del tempo.

Il Secondo principio della termodinamica non è una legge nel senso in cui lo è il Principio di conservazione dell'energia. È invece l'affermazione statistica che invertire lo stato di un sistema isolato non è impossibile,

benché sia assurdamamente improbabile. Perciò, se fracassaste un bicchiere sul pavimento e lo vedeste poi ricomporsi e ritornare con un balzo sul tavolo, la cosa in effetti non violerebbe le leggi della fisica – Newton ed Einstein non avrebbero motivo di rivoltarsi nella tomba. Perché no? Mentre il bicchiere urta contro il pavimento, la sua energia potenziale si converte in energia cinetica sotto forma di aumento del moto delle molecole di aria (da qui il suono del bicchiere che si rompe). Grazie al Principio di conservazione dell'energia la quantità totale di energia resta immutata (il principio non prevede eccezioni) e, almeno in linea di

principio, nulla vieta alle molecole d'aria di riassumere alla fine la configurazione originaria, impiegando la medesima quantità di energia per ricomporre tutte le schegge di vetro e ricollocare il bicchiere tutto intero sul tavolo.

Dunque il Secondo principio della termodinamica non vieta tassativamente ai palloncini di rigonfiarsi, ai bicchieri rotti di ricomporsi e ai cubetti di ghiaccio di risolidificarsi, ma attua il piano B: in pratica fa in modo che fenomeni di questo tipo non accadano. Così la cosiddetta *freccia entropica del tempo* pare fornire una spiegazione assai efficace del motivo per cui tutti i fenomeni si svolgono seguendo una sola

direzione. Ma, sfortunatamente, non così efficace come sembra.

La freccia a due punte

Immaginiamo adesso che la nostra scatola abbia in totale 10 atomi di idrogeno, e immaginiamo di osservare che in un istante dato (lo chiameremo t) ci sono 4 atomi a sinistra e 6 a destra. Rappresentiamo questo stato con la notazione $[4, 6]$. Sappiamo che lo stato di massima entropia è quello in cui ci sono 5 atomi in ciascuna metà della scatola $[5, 5]$, dato che il numero delle possibili distribuzioni $[5, 5]$ è maggiore di quello di ogni altra distribuzione. Perciò nell'istante successivo, $t + 1$, possiamo prevedere che avremo più probabilità di osservare lo stato $[5, 5]$ – un incremento di entropia – che lo stato

[3, 7]. Ma, invece di proiettarci nel futuro, volgiamoci al passato e domandiamoci quale fosse lo stato più probabile della scatola nell'istante precedente, $t - 1$. Ebbene, in base alla stessa logica, la risposta sarà anche in questo caso [5, 5]. In assenza di qualunque altra informazione sul sistema, se lo stato più probabile dopo una configurazione

[4, 6] è la configurazione [5, 5], ne consegue che lo stato precedente più probabile è a sua volta [5, 5]. Si noti che in questo caso non ho detto che all'inizio tutti e 10 gli atomi si trovavano nello stesso lato della scatola; anzi, è possibile che il sistema sia partito dalla configurazione [5, 5] e che

[4, 6] sia il risultato di una normale fluttuazione.

Questo è un po' un colpo inaspettato. È scoraggiante constatare che il Secondo principio della termodinamica predice che l'entropia aumenta procedendo verso il futuro *e* retrodice che aumenta andando a ritroso nel tempo. La freccia entropica del tempo sembra essere una freccia a due punte. La spiegazione termodinamica del perché il tempo pare essere una strada a senso unico suona sensata solo perché contiene un'ipotesi nascosta. Nei primi esempi discussi avevamo ipotizzato che in origine tutti gli atomi si trovassero nella metà sinistra della scatola, cioè in uno stato

di entropia estremamente bassa. Se partiamo dallo stato di entropia minima, l'entropia può *solo* aumentare. Pertanto il Secondo principio della termodinamica istituisce una freccia del tempo solamente se si presuppone che l'universo sia partito da una condizione di bassa entropia.

Spesso si sostiene che il tempo ha avuto inizio con il Big Bang, circa 14 miliardi di anni fa, e in effetti negli istanti successivi al Big Bang l'universo si trovava in una condizione di bassa entropia. Allora il problema della freccia del tempo diventa il seguente: *come mai l'universo si è venuto a trovare in questa condizione di bassa entropia?* Ludwig Boltzmann era

consapevole dell'importanza di questa domanda, e avanzò un'ipotesi ingegnosa: che la condizione di bassa entropia dell'universo sia la conseguenza di una fluttuazione passeggera all'interno di quello che in precedenza era un universo ad alta entropia. Se questa proposta sembra in contraddizione con il principio enunciato dallo stesso Boltzmann è perché in un certo senso lo è. Ma, come detto, il Secondo principio della termodinamica ha carattere statistico: i cali di entropia sono improbabili, non impossibili, e, data una quantità di tempo sufficiente, l'improbabile diventa probabile. Un'ipotesi correlata che è stata avanzata

più di recente per spiegare il mistero della bassa entropia è l'ipotesi del *multiverso*, in base alla quale il nostro universo avrebbe avuto inizio come una regione a bassa entropia locale all'interno di un multiverso molto più vasto.^{[11](#)} Ciononostante, non esiste alcuna spiegazione condivisa del motivo per cui l'universo sia partito da una condizione di bassa entropia, e, inutile a dirsi, è improbabile che le questioni riguardanti l'inizio dell'universo – e dunque l'inizio del tempo – vengano risolte in tempi brevi.

Il Secondo principio della termodinamica offre una possibile spiegazione del motivo per cui il tempo

marcia ineluttabilmente in avanti – o almeno del motivo per cui l'universo ha visto aumentare progressivamente la propria entropia a partire dalla sconcertante condizione di bassa entropia esistente al tempo del Big Bang. Ma esistono anche altre ipotesi di spiegazione. Una di esse sostiene che la meccanica quantistica incorpora dei processi (delle «frecce») temporalmente irreversibili. Ho detto in precedenza che tutte le leggi della fisica a noi note, compresa l'equazione che governa il mondo dei quanti (l'equazione di Schrödinger), sono temporalmente reversibili. Ma vi è un ulteriore aspetto della meccanica quantistica, non contemplato nell'equazione di

Schrödinger, che lascia interdetti gli scienziati da quasi un secolo. Se spariamo un singolo elettrone in direzione di una lastra fotografica, l'equazione di Schrödinger ci fornisce la *probabilità* che l'elettrone sia osservato in una data posizione nell'istante t . Ma per *sapere* effettivamente dove si trova l'elettrone occorre effettuare una misura, e l'equazione di Schrödinger non descrive che cosa accade nella fase di misurazione. Fino a quando la misura non viene effettuata (ad esempio mediante l'urto dell'elettrone contro la lastra), si dice che l'elettrone si trova simultaneamente in tutte le posizioni possibili. È solo l'atto del misurare la

sua posizione che lo costringe a occupare una posizione definita: si dice che la misurazione fa collassare la *funzione d'onda* dell'elettrone. Ma non c'è accordo su che cosa esattamente, nel processo di misurazione, faccia collassare la funzione d'onda (o persino se quest'ultima collassi davvero). Alcuni fisici reputano che la fase di misurazione della meccanica quantistica imponga una freccia del tempo all'universo.^{[12](#)} Secondo questa concezione, una volta che la posizione dell'elettrone viene misurata, non si può tornare indietro. In effetti, dopo che è avvenuta la misurazione, è impossibile utilizzare l'equazione di Schrödinger per

retrodire attraverso quale fenditura è passato l'elettrone.¹³

Anche se risultasse che la meccanica quantistica impone una freccia del tempo all'universo – un fatto che molti ritengono improbabile – rimane il fatto che le sue leggi e qualunque altra legge fisica non attribuiscono particolare significato all'*adesso*.¹⁴ Le equazioni fondamentali della fisica paiono implicare che l'*adesso* sta al *tempo* come il *qui* sta allo *spazio*, ed è per questa ragione che numerosi fisici e filosofi pensano che viviamo nell'universo-blocco dell'eternalismo. Ma per molti, me compreso, non è questo l'argomento più persuasivo a

favore di tale ipotesi: come vedremo nel prossimo capitolo, la ragione migliore per scegliere l'eternalismo è probabilmente la teoria della relatività di Einstein.

9:00

La spazializzazione del tempo in fisica

Per noi che crediamo nella fisica, la divisione tra passato, presente e futuro ha solo il valore di un'ostinata illusione.

Albert Einstein¹

Una cosa che rende la pallacanestro tanto appassionante è il fatto che il finale di una partita può trasformarsi in una gara contro il tempo. Il giocatore che effettua l'ultimo tiro deve far partire la palla prima che il cronometro segni zero e che la sirena suoni. Se la palla

lascia le sue mani prima che il cronometro arrivi a zero, il tiro è valido. Sembrerebbe che stabilire quale di questi due eventi sia avvenuto prima sia una questione del tutto oggettiva: o la palla ha lasciato la mano del giocatore prima del tempo zero, oppure no. Risulta invece che le cose non stanno così.

A mo' di esperimento mentale, supponiamo che un arbitro stabilisca che un tiro decisivo effettuato a un'estremità del campo abbia effettivamente lasciato la mano del giocatore prima che un orologio atomico all'altra estremità del campo arrivasse a zero. Impiegando delle apparecchiature ad alta tecnologia l'arbitro successivamente conferma che quando la palla è stata tirata mancava

ancora un intero nanosecondo (un miliardesimo di secondo) alla fine. Supponiamo inoltre che, trattandosi della gara 7 della finale dell'NBA, un astronauta stesse guardando la partita attraverso un telescopio mentre si trovava a bordo di un'astronave che viaggiava a una velocità pari a metà di quella della luce.² Quando vede che il canestro è stato convalidato, all'astronauta vien fatto di diffamare la beneamata madre dell'arbitro, avendo egli verificato che l'orologio aveva raggiunto lo zero *prima* che la palla fosse tirata e che pertanto il canestro non dovrebbe essere convalidato. Questi resoconti divergenti circa la validità del

canestro e di conseguenza circa la squadra a cui assegnare il titolo non hanno nulla a che vedere con i ritardi associati alla quantità di tempo che le informazioni impiegano a raggiungere l'astronave: supponiamo infatti che tutti i soggetti coinvolti abbiano tenuto conto di tali ritardi. Le due narrazioni non sono altro che due realtà ugualmente valide, una nella quale la squadra vittoriosa ha meritato la vittoria e l'altra in cui l'arbitro ha falsato la partita.

Come può accadere una cosa simile? È possibile che due eventi avvengano in un certo ordine per un osservatore, e in un ordine differente per un altro? Se sì, che indicazioni se ne possono trarre circa la natura del tempo? Per

rispondere a queste domande dobbiamo addentrarci nella teoria della relatività ristretta di Einstein.

La relatività ristretta

L'elettrodinamica dei corpi in movimento, il titolo piuttosto dimesso dell'articolo di Einstein, non lasciava presagire che si trattasse di un lavoro destinato a cambiare il corso della scienza. Einstein elaborò la teoria presentata nell'articolo – la teoria speciale della relatività – a partire da due principi. Il primo è che *le leggi della fisica sono le medesime per tutti gli osservatori che si muovono a velocità costante.*³ Einstein trasse questo cosiddetto *principio di relatività* da Galileo, il quale lo aveva introdotto mettendo in evidenza che, per un osservatore situato su una nave che si

muove senza scosse a velocità costante, è impossibile sapere se la nave si sta effettivamente muovendo oppure no (potete immedesimarvi in questa situazione se per caso vi è capitato, mentre eravate a bordo di un aereo, di svegliarvi un po' storditi e di non riuscire lì per lì a capire se l'aereo era in volo, stava rullando o era fermo sulla pista). In conseguenza del principio di relatività, definiamo sempre la velocità in relazione a qualcos'altro. Quando diciamo che un'automobile procede a 100 km/h intendiamo dire che lo fa in relazione a oggetti fissi sul pianeta Terra, ad esempio in relazione al cartello che indica il limite di 80 km/h. Ma a rigore non esiste alcun sistema di

riferimento corretto o assoluto. In rapporto alla vettura della polizia che sfreccia in senso opposto, la velocità della nostra automobile sarà ben superiore a 100 km/h; inoltre, è altrettanto legittimo dire che l'auto è ferma e il cartellone pubblicitario viaggia a 100 km/h. La velocità con cui procede un dato oggetto è dunque relativa al sistema di riferimento prescelto. Con un'eccezione...

La velocità della luce nello spazio vuoto è costante e indipendente dal moto del corpo che l'ha emessa. Questo è il secondo principio di Einstein. A prima vista l'idea che la velocità della luce sia costante può suonare piuttosto

innocua, ma, abbinata al principio di relatività, ha l'effetto di demolire la nozione di tempo assoluto. Per comprendere le conseguenze della costanza della velocità della luce esaminiamo prima di tutto il concetto di velocità dettoci dal buon senso. Se siete su un treno che viaggia a 100 km/h e sparate un proiettile nella direzione del moto del treno – con un fucile che spara proiettili a 300 km/h – osserverete il proiettile allontanarsi da voi a 300 km/h. Se assistessi alla scena dalla banchina della stazione, dedurrei, come suggerisce l'intuizione, che la velocità del proiettile è pari a quella del treno più quella del proiettile stesso: 400

km/h.⁴ Consideriamo ora uno scenario simile, ma nell'ambito del secondo principio di Einstein (la costanza della velocità della luce). Il vostro treno procede all'assurda velocità di 100 000 km/s (un terzo della velocità della luce), e voi, anziché un proiettile, sparate un raggio laser nella direzione di viaggio del treno. La punta del fascio laser si allontanerà da voi alla velocità di 300 000 km/s (la velocità approssimativa della luce, indicata con c). Logica vorrebbe che, mentre voi osservate il raggio che procede a 300 000 km/s, io debba di nuovo osservare che la sua velocità è pari a quella del treno sommata a quella della luce:

400 000 km/s ($1,33c$). Ciò sarebbe tuttavia una grave violazione del principio della costanza della velocità della luce, il quale prescrive che chiunque, indipendentemente dalla propria velocità, misuri la velocità della luce troverà sempre il valore c (sarebbe inoltre una violazione di un risultato correlato della relatività ristretta, ossia che nulla può viaggiare con una velocità maggiore della luce). Il punto è dunque che per voi e per me il raggio di luce emesso dal laser avrà esattamente la stessa velocità.

Intuitivamente la cosa è molto inquietante. Voi calcolerete che dopo un secondo la punta del raggio laser ha staccato il treno di 300 000 km. Poiché

anch'io vedo viaggiare il raggio alla medesima velocità, ne desumerò che il raggio è 300 000 km oltre la stazione e, siccome so che il vostro treno procede a 100 000 km/h, che il treno deve aver superato esattamente di 100 000 km la stazione. Perciò, all'interno del mio sistema di riferimento, la distanza fra il treno e il raggio dovrebbe essere la differenza fra le loro rispettive posizioni: $300\ 000 - 100\ 000 = 200\ 000$ km. Ma voi avete appena osservato che il raggio di luce vi precede di 300 000 km! *Qualcosa non quadra*. Detto in maniera semplice, il prezzo da pagare affinché la velocità della luce sia assoluta è che lo spazio e il tempo non

devono esserlo! I nostri calcoli non combaciano perché risulta che io e voi non stiamo esperendo lo spazio e il tempo nello stesso modo.

Il 1905 fu l'*annus mirabilis* di Einstein, l'anno in cui, mentre era ancora impiegato all'Ufficio dei brevetti di Berna, pubblicò quattro articoli di enorme impatto scientifico. Nell'articolo sulla relatività ristretta ricavò un insieme di equazioni che descrivono come il tempo si dilati (e lo spazio si contragga) in funzione della velocità. È interessante notare che le equazioni sono chiamate trasformazioni di Lorentz, perché furono proposte per la prima volta dal fisico olandese Hendrik Lorentz. Ma Lorentz non colse

appieno le implicazioni delle sue equazioni, né si rese conto che queste ultime potevano essere derivate dai due principi sopra menzionati. Vale la pena di dare una rapida occhiata a una versione ridotta della trasformata di Lorentz concernente il tempo,⁵ poiché si tratta di una delle equazioni sul tempo più importanti della storia del tempo. L'equazione contiene solo operazioni algebriche, e converte il tempo indicato dal vostro orologio mentre viaggiate a bordo del treno (t voi) nel tempo indicato dal mio orologio mentre mi trovo sulla banchina (t io) (assumendo che sia voi che io facciamo partire il cronometro nell'istante in cui passate

sfrecciando davanti a me).
Nell'equazione, v rappresenta la
velocità fra di noi e la costante c è,
come detto, la velocità della luce:

$$t^{io} = \frac{t^{voi}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Poiché c è un numero elevatissimo, a
velocità ordinarie la frazione v^2/c^2 sarà
prossima a zero e il denominatore
vicinissimo a $\sqrt{1}$, cioè a 1. Perciò t^{io}
sarà all'incirca uguale a t^{voi} . Questa è

precisamente la nostra esperienza: tutti i nostri orologi ticchettano con lo stesso ritmo e rimangono sincroni perché, anche quando ci muoviamo, lo facciamo a velocità basse (in rapporto alla velocità della luce). Ma a velocità vicine a quella della luce il ritmo degli orologi cambia. Se, come nell'esempio precedente, vi trovate su un treno che procede a un terzo della velocità della luce, dopo un secondo di viaggio così come è misurato dal vostro orologio ($t_{voi} = 1$), t_{io} sarà uguale a 1,06 secondi. Non è una differenza enorme, ma se viaggiate a una velocità molto più vicina a quella della luce, ad esempio a $v = 0,999c$, per un anno ($t_{voi} = 1$ anno), t_{io} risulterebbe pari a oltre ventidue

anni. Diremmo allora che per voi il tempo si è dilatato: io sono invecchiato di ventidue anni e voi solo di uno.⁶

Uno dei primi esperimenti per verificare la dilatazione del tempo fu eseguito collocando degli orologi atomici su aerei di linea e confrontando la loro misura del tempo con quella di altri orologi atomici collocati al suolo. Gli orologi viaggiarono per centinaia di ore su aerei diretti a est (la direzione del volo conta a causa della rotazione della Terra) e, come previsto dalla relatività ristretta, rimasero indietro – di decine di miliardesimi di secondo – rispetto agli orologi atomici situati presso lo US Naval Observatory di Washington.⁷

Questo e molti altri esperimenti hanno confermato che il tempo non è assoluto. Newton aveva torto: il tempo meccanico non «scorre in modo uniforme senza relazione con alcunché di esterno».

La simultaneità perduta

Il tempo meccanico è sempre misurato da un cambiamento, sia esso l'oscillazione di un pendolo o la variazione di quantità della proteina Period nel nucleo soprachiasmatico; e il cambiamento è sempre un fenomeno locale. Non abbiamo problemi ad accettare l'idea che la velocità con cui certe cose cambiano possa essere influenzata dall'ambiente in cui si trovano. È questa fra l'altro la ragione per cui abbiamo inventato i frigoriferi: nel frigorifero un pomodoro «invecchia» più lentamente rispetto al suo gemello rimasto sul piano di lavoro. La misura del tempo effettuata da un orologio a

pendolo o dall'orologio circadiano del moscerino della frutta può inoltre essere influenzata dalla temperatura dell'ambiente. Ma l'effetto della temperatura può variare a seconda dell'orologio, e può anche non essere presente. Per esempio, i tempi di decadimento dei radioisotopi discussi nel [Capitolo 7](#) sono praticamente gli stessi anche a temperature prossime allo zero assoluto. Viceversa, l'effetto che la velocità esercita sul ritmo di qualunque genere di orologio è un effetto assoluto e non negoziabile. Qualsiasi oggetto fisico, sia esso un orologio atomico o il corpo umano, muta con maggiore o minore rapidità a seconda della velocità con cui sta viaggiando. Se ciò può

essere sconcertante, vi è un'altra conseguenza della teoria della relatività ristretta di Einstein che lo è ancora di più.

Torniamo al nostro esperimento mentale del treno e della banchina e consideriamo di nuovo il mondo ordinario, nel quale tutto avviene a basse velocità. Supponiamo ora di sparare dei proiettili in direzioni opposte a bordo di un treno in movimento. Immaginate di trovarvi a metà di un treno lungo 200 metri che, rispetto a me che sono fermo sulla banchina, viaggia alla velocità di 100 metri al secondo ([Fig. 9.1](#)).

Nel momento in cui la punta del treno

sfreccia davanti a me, voi fate fuoco con due pistole, i cui proiettili viaggiano anch'essi a 100 m/s : il primo diretto contro il parabrezza in testa al treno, il secondo diretto contro il lunotto in coda. Dalla vostra prospettiva i proiettili viaggiano alla medesima velocità e devono percorrere la stessa distanza, sicché frantumano il parabrezza e il lunotto simultaneamente: 1 secondo esatto dopo che avete premuto il grilletto. Dalla mia prospettiva vedo il proiettile sparato in avanti che si muove a una velocità di 200 m/s (la velocità del treno più quella del proiettile) e il parabrezza andare in frantumi dopo 1 secondo perché il proiettile ha dovuto percorrere 200 m (metà della lunghezza

del treno più la distanza percorsa dal treno in 1 secondo). Osserverò inoltre il proiettile sparato all'indietro muoversi a 100 m/s (la velocità del treno) meno 100 m/s (la velocità del proiettile è negativa perché viaggia nella direzione opposta). In altre parole, vedo il proiettile rimanere sospeso a mezz'aria mentre il lunotto gli sbatte contro (è meglio ipotizzare che tutto ciò avvenga nel vuoto e su un pianeta con bassa gravità). Anche questo evento si verifica dopo 1 secondo, perché la coda del treno si trovava a 100 metri dal punto in cui avete fatto fuoco. Come avrebbe previsto Newton, sia voi che io constatiamo che il parabrezza e il

lunotto del treno si rompono nello stesso istante.

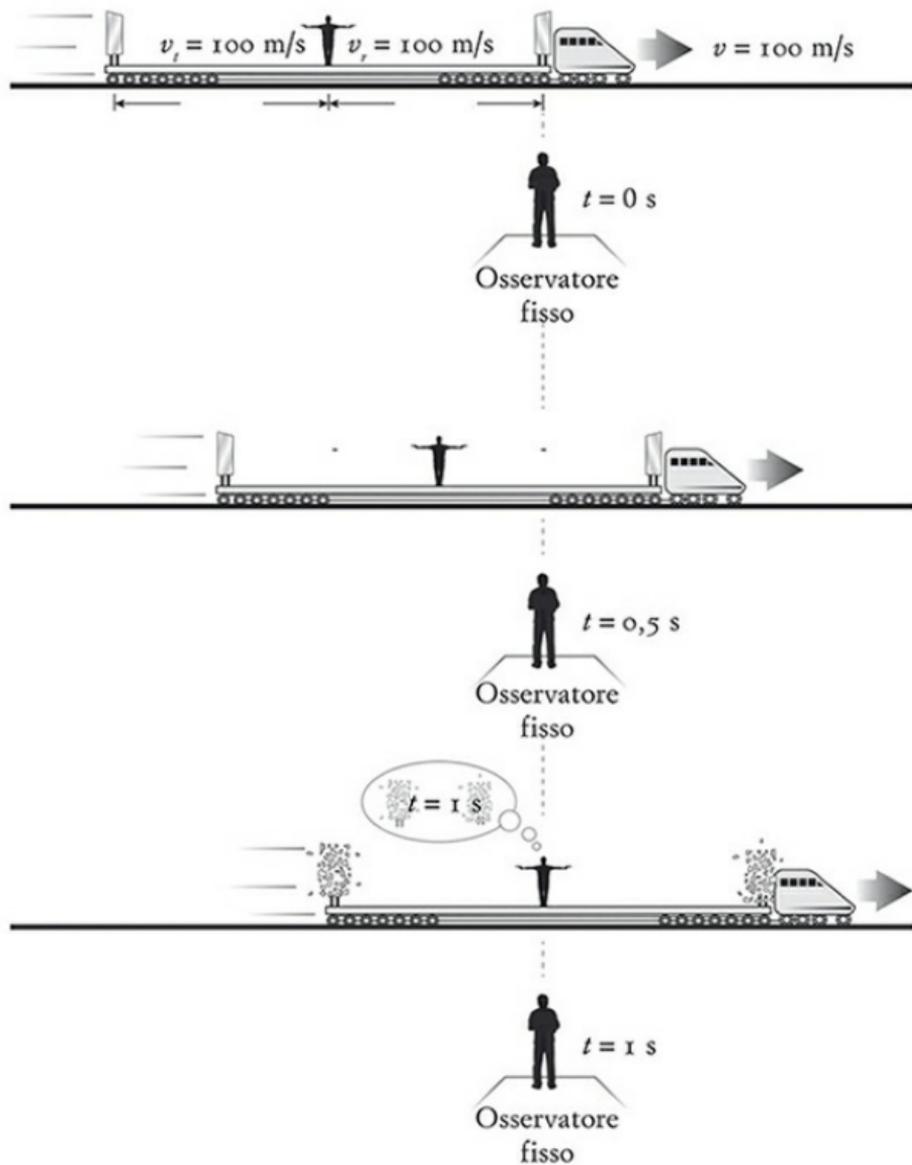


Figura 9.1

Il treno di Newton. Applicando le leggi di Newton, se un osservatore che si trova a metà di un treno in movimento spara due proiettili in direzioni opposte ($t = 0$), per tutti gli osservatori il parabrezza in testa al treno e il lunotto in coda si infrangeranno simultaneamente a $t = 1$ secondo.

In questo caso diremmo che la simultaneità è assoluta: i due eventi che voi vedete verificarsi simultaneamente, si verificano simultaneamente anche dalla mia prospettiva.

Vediamo che cosa accade se svolgiamo un esperimento mentale analogo, ma con velocità e distanze molto più elevate ([Fig. 9.2](#)). Vi trovate ora a bordo di un treno ridicolmente lungo (400 000 km)⁸ che viaggia a due

terzi della velocità della luce: circa 200 000 km/s ($0,667c$). Anche in questo caso tutto è predisposto in modo che, quando la punta del treno mi raggiunge, voi facciate fuoco con due pistole a particelle (di prossima invenzione) i cui proiettili viaggiano anch'essi a 200 000 km/s e si dirigono rispettivamente contro il parabrezza e il lunotto del treno. Dato che vi trovate a metà del treno, vedrete di nuovo i due vetri rompersi nello stesso istante: precisamente 1 secondo, stando al vostro orologio, dopo che avete fatto fuoco, perché entrambi i proiettili hanno dovuto percorrere 200000 km alla velocità di 200000 km/s.

E, di nuovo, io vedrò il proiettile

diretto verso la coda del treno fermo a mezz'aria (perché la velocità del treno meno quella del proiettile è uguale a zero) mentre il lunotto si scaglia contro il proiettile alla velocità di 200 000 km/s. Ma a quale velocità vedrò muoversi il proiettile sparato in avanti? Affinché, dalla mia prospettiva, i due proiettili colpiscano simultaneamente i rispettivi bersagli, il proiettile diretto contro il parabrezza deve percorrere una distanza uguale all'intera lunghezza del treno (la metà lunghezza iniziale più la distanza percorsa dal treno) nella stessa quantità di tempo che la coda del treno impiega a raggiungere il proiettile sparato all'indietro. Poiché deve

percorrere una distanza doppia rispetto a quest'ultimo, il proiettile sparato in avanti dovrebbe viaggiare a velocità ben superiori a quella della luce, ma la relatività

ristretta ci dice che la sua velocità sarà invece di circa 277 000 km/s ($0,92c$). È perciò evidente che io non vedrò il parabrezza e il lunotto infrangersi nello stesso istante. Anche se voi vedrete i due vetri rompersi simultaneamente, io vedrò rompersi prima il lunotto! Questa discrepanza non ha assolutamente nulla a che fare con eventuali ritardi di trasmissione connessi all'intervallo di tempo che i segnali provenienti da parti differenti del treno impiegano a

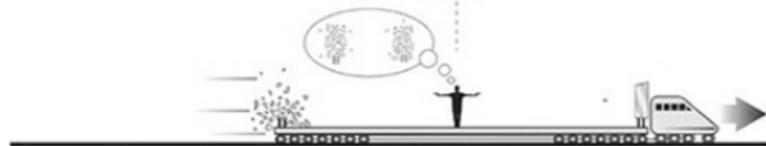
raggiungere me o voi;⁹ tali esperienze apparentemente in contraddizione fra loro rappresentano invece due realtà ugualmente fondate. La simultaneità, e l'ordine in cui si svolgono due eventi, possono essere relativi.¹⁰



Osservatore
fisso



Osservatore
fisso



Osservatore
fisso

Figura 9.2

Il treno di Einstein. A velocità elevate la relatività ristretta ci dice che osservatori diversi esperiscono lo spazio e il tempo in modo diverso (rendendo molto problematico creare delle figure che illustrino la questione). Gli orologi collocati sul treno e sulla banchina sono impostati in modo da segnare $t = 0$ allorché la testa del treno raggiunge l'osservatore sulla banchina. Quando l'osservatore sul treno e quello sulla banchina si troveranno uno di fronte all'altro, il primo assisterà alla rottura contemporanea del parabrezza e del lunotto, mentre il secondo vedrà il lunotto rompersi prima del parabrezza.

Lo spaziotempo

Proviamo a digerire ancora un po' i risultati di questi esperimenti mentali. Dal vostro sistema di riferimento, in ogni istante di tempo, entrambi i vetri risultano essere intatti *oppure* rotti. Per me invece ci sarà un momento nel quale il lunotto è rotto ma il parabrezza no. Ciò è profondamente sconcertante. Com'è possibile che per voi entrambi i vetri esistano in uno stato frantumato, mentre per me uno dei due è ancora intatto? È come se vivessimo in universi alternativi.

La nostra soluzione a questo rompicapo è la spazializzazione del tempo, cioè l'universo-blocco. Se

assumiamo che tutti gli eventi passati o futuri sono – come postula l’eternalismo – permanentemente collocati in qualche punto dell’universo-blocco, allora la relatività della simultaneità diventa non più sconcertante del fatto che due oggetti spaziali possano apparire allineati oppure no a seconda del punto da cui li osserviamo. Due pali del telefono lungo un’autostrada ci appaiono allineati se ci troviamo sul ciglio della strada, ma non ci appaiono tali se siamo in mezzo alla strada: è una questione di prospettiva. Analogamente, può apparire che entrambi i vetri si rompano simultaneamente perché dalla vostra prospettiva, ma non dalla mia, sono «allineati» nello spaziotempo. Ecco

perché la teoria della relatività ristretta offre uno degli argomenti più cogenti a favore dell'eternalismo.^{[11](#)}

È interessante notare che, quando pubblicò il suo articolo sulla teoria della relatività ristretta, Einstein non affermò che il tempo dovesse essere concepito come la quarta dimensione di un universo-blocco. Fu l'ex professore di Einstein a Zurigo, Hermann Minkowski (che, a quanto si narra, quando Einstein era studente lo considerava uno «sfaticato») ad afferrare per primo le conseguenze radicali che la relatività ristretta comporta in ordine al rapporto fra spazio e tempo. Nel 1908, dopo aver

sviluppato la sua teoria basandosi sul lavoro del suo ex allievo, Minkowski annunciò in maniera magniloquente: «D'ora in poi lo spazio in sé, e il tempo in sé, sono destinati a divenire pure ombre, e solo una sorta di unione fra i due manterrà una realtà indipendente».

Minkowski aveva fuso lo spazio e il tempo nello spaziotempo. Egli elaborò una riformulazione geometrica della teoria della relatività ristretta di Einstein, una riformulazione comprendente le tre normali dimensioni spaziali e una quarta dimensione temporale. L'intuizione di Minkowski fu che, sebbene lo spazio e il tempo siano relativi, l'amalgama dei due è invece assoluto. Se vi imbarcate in un viaggio a

zig-zag sulla vostra astronave mentre io rimango sulla Terra a osservarvi da lontano, al vostro ritorno non concorderemo, consultando i nostri rispettivi orologi, circa la quantità di tempo che avete trascorso in viaggio e la distanza che avete percorso, ma saremo d'accordo sulla «distanza» che avete percorso nello spaziotempo. Possiamo semplificare l'universo quadridimensionale di Minkowski riducendolo a una sola dimensione spaziale, che rappresenteremo come asse delle ascisse di un grafico, e alla dimensione temporale, corrispondente all'asse delle ordinate. Stare fermi consiste in un movimento lungo l'asse

delle ordinate: il tempo sta passando, ma la mia posizione nello spazio non cambia. Il vostro viaggio sull'astronave corrisponde invece a un movimento in diagonale. Sulla base del cambiamento di posizione lungo i due assi è possibile calcolare la distanza percorsa nello spaziotempo, un valore su cui tutti gli osservatori concorderanno. Questa distanza è connessa al cosiddetto *tempo proprio* (il tempo «locale»): il tempo misurato dall'orologio che si trova sulla vostra astronave.

La relatività ristretta è detta appunto *ristretta* (o *speciale*) perché si applica a un universo semplificato nel quale è possibile ignorare l'influenza della gravità. Dopo aver enunciato la teoria

della relatività ristretta, Einstein spese dieci anni di ardui sforzi per sviluppare una teoria più generale. Il risultato fu il suo capolavoro, la *teoria della relatività generale*, in cui si afferma l'equivalenza fra gravità e accelerazione. Benché la legge di gravitazione di Newton descrivesse la relazione intercorrente tra la forza di gravità, la massa e la distanza, Newton fornì pochi elementi per comprendere che cosa sia *realmente* la gravità. La relatività generale offrì una risposta sorprendente: la gravità non è una forza in sé, ma è la curvatura dello spaziotempo. In questo modo il matrimonio di spazio e tempo celebrato

da Minkowski ricevette un'ulteriore legittimazione. Vi è chi sostiene che, rispetto alla teoria della relatività ristretta, la teoria della relatività generale fornisca un argomento ancora più potente a favore dell'eternalismo, poiché alcune soluzioni delle sue equazioni ammettono la possibilità di viaggiare nel tempo: date certe ipotesi e condizioni iniziali, tali equazioni rendono cioè possibile balzare nel passato e nel futuro. Una discussione dettagliata della relatività generale esula dall'ambito di questo libro, oltre che dalla competenza del suo autore. Per fortuna, tuttavia, dal nostro punto di vista la relatività ristretta racchiude in sé l'argomento fondamentale a favore

dell'eternalismo e dell'universo-blocco.

L'idea che il passato, il presente e il futuro siano parimenti reali si fa beffe della nostra percezione della realtà; pertanto, se fisici e filosofi preferiscono l'eternalismo al presentismo, devono avere ragioni molto persuasive per farlo. Abbiamo visto tre di queste ragioni:

1. Le leggi della fisica non forniscono alcun sostegno all'idea che l'*adesso* sia più speciale del *qui*, il che implica che tutti gli istanti del tempo sono reali quanto tutti i luoghi dello spazio.

2. La relatività ristretta afferma che due eventi distanti nello spazio che sono

simultanei per un osservatore, non sono simultanei nel sistema di riferimento di un altro osservatore, sicché tutti gli istanti del tempo sono eternamente collocati all'interno dell'universo-blocco.[12](#)

3. Vi sono soluzioni delle equazioni della relatività generale che implicano la possibilità di viaggiare nel tempo, e dunque implicano che viviamo in un universo eternalista in cui il passato e il futuro, in qualche senso, sono già “là fuori”.

Eppure, nonostante questi persuasivi argomenti a favore dell'eternalismo, dobbiamo ammettere che le leggi della fisica non riescono a spiegare ciò che

parrebbe essere una delle più solide e inequivocabili osservazioni appartenenti alla nostra esperienza di esseri umani: *che il presente è speciale e che il tempo scorre realmente.*

È possibile conciliare la fisica e le neuroscienze del tempo?

Come l'epigrafe di questo capitolo suggerisce, Einstein era un eternalista,¹³ ma sembrava anche tormentato dall'apparente posizione speciale occupata dal presente. Nel riferire una discussione avuta con Einstein, il filosofo Rudolf Carnap sviluppò una celebre riflessione sul tema:

Una volta Einstein disse che il problema dell'*Ora* lo preoccupava seriamente: spiegava che l'esperienza dell'*Ora* significa per l'uomo qualcosa di particolare, qualcosa di essenzialmente differente dal passato e dal futuro, ma che questa importante differenza non ricorre e non può ricorrere nella fisica. Il

fatto che tale differenza non potesse essere colta dalla scienza gli sembrava un elemento di penosa ma inevitabile rassegnazione; io osservai che tutto ciò che oggettivamente accade può essere descritto dalla scienza; da una parte le sequenze temporali degli eventi sono descritte dalla fisica, mentre dall'altra, le particolarità delle esperienze dell'uomo in rapporto al tempo, compreso il suo differente atteggiamento verso passato, presente e futuro, possono essere descritte e (in linea di principio) spiegate dalla psicologia.¹⁴

In linea con quanto suggerito da Carnap, molti fisici e filosofi pensano che l'unico modo per conciliare l'idea che viviamo in un universo dove il tempo non scorre con il fatto che il tempo sembra scorrere davvero consista

nell'abbassare la nostra sensazione del passaggio del tempo al rango di semplice trucco mentale.

In pratica i fisici possono generalmente ignorare la dissonanza fra la fisica e le neuroscienze del tempo. Le equazioni della relatività ristretta e della relatività generale rendono conto incredibilmente bene dei dati sperimentali, sia che le utilizzi un eternalista sia che le utilizzi un presentista. Eppure questo paradosso dell'«universo-blocco/flusso del tempo» è un paradosso profondo. Come ha scritto il fisico matematico Roger Penrose:

Mi pare ci siano gravi discordanze fra ciò che

noi proviamo coscientemente riguardo al fluire del tempo e ciò che le nostre teorie (mirabilmente precise) asseriscono circa la realtà del mondo fisico. Queste discordanze ci dicono di certo qualcosa di profondo sui meccanismi fisici che presumibilmente stanno alla base delle nostre percezioni coscienti...[15](#)

Analogamente, il fisico e saggista Paul Davies scrive:

A mio avviso il problema più sconcertante riguarda l'evidente discrepanza tra tempo fisico e tempo soggettivo o psicologico. [...] L'impressione dominante di un flusso temporale in moto, forse acquisita attraverso una "porta di servizio" mentale, è ancora un profondo mistero. È forse in relazione con processi quantistici che avvengono nel cervello? Riflette forse una quantità di tempo

oggettivamente reale «all'esterno», nel mondo degli oggetti materiali, che noi abbiamo semplicemente trascurato? O verrà invece dimostrato che, dopo tutto, il flusso del tempo è soltanto un costrutto mentale, il frutto di un'illusione o di una confusione?¹⁶

Come potrebbe una cosa tanto evidente come lo scorrere del tempo essere un'illusione architettata dal cervello? Una risposta a questa domanda suona più o meno così: in analogia con una pellicola cinematografica, possiamo concepire l'universo-blocco come una serie di fotogrammi statici. Anche se una pellicola contiene molti fotogrammi diversi – ciascuno corrispondente a un

istante di tempo – possiamo dire che tutti i fotogrammi coesistono all'interno della pellicola. Come nei filmi girati in famiglia, ognuno di noi è presente in molti dei fotogrammi dell'universo-blocco. In ciascuno di essi la nostra mente ha ricordi dei fotogrammi immediatamente precedenti. Si è ipotizzato che questo accesso integrato a molteplici momenti temporali racchiusi in un singolo momento generi in qualche modo la nostra sensazione soggettiva dello scorrere del tempo. Il fisico battitore libero Julian Barbour illustra il concetto descrivendo l'osservazione dei movimenti di un martin pescatore (un uccello che, come suggerisce il nome, è un pescatore provetto):

Quando pensiamo di vedere movimento in un certo istante, la realtà alla base di tutto ciò è che il cervello in quell'istante contiene dati che corrispondono a parecchie posizioni diverse dell'oggetto percepito in movimento. Il cervello, in ogni singolo istante, contiene simultaneamente parecchie «istantanee». In virtù di come presenta i dati alla coscienza, in qualche modo mi «proietta il film». [...] Vedo, codificate nelle configurazioni neuronali, sei o sette istantanee del martin pescatore, esattamente come si sono presentate nel volo che ho pensato di vedere. Questa configurazione cerebrale, nonostante la sua codifica simultanea di parecchie istantanee, appartiene a un solo punto di Platonia.¹⁷

Come accennato nel [Capitolo 1](#), Barbour, insieme ad alcuni altri fisici,

aderisce a una versione piuttosto estrema della spazializzazione del tempo. Egli prende l'universo-blocco dell'eternalismo, lo taglia lungo l'asse temporale e quindi ne distribuisce le fette in un universo che chiama *Platonìa*. Barbour asserisce che tutti i possibili istanti – cioè tutte le configurazioni diverse della materia, comprendenti tutti gli istanti del tempo – sussistono come *adesso* statici.

Nel contesto della versione più usuale di eternalismo, il fisico Brian Greene presenta un'idea simile per spiegare il modo in cui, pur essendo noi imprigionati in una fetta dell'universo-blocco, percepiamo il tempo scorrere:

Ogni momento dello spaziotempo, ogni fetta temporale, è come uno dei fotogrammi fissi di un film. [...] per noi che ci troviamo in uno qualsiasi di quei momenti, è *l'adesso*, il momento che viviamo *in quel* momento, e sempre lo sarà. Inoltre, in ogni singola fetta, pensieri e ricordi sono tali da alimentare la sensazione che il tempo sia sempre fluìto, fino a quel momento. Si tratta di una sensazione che non richiede momenti precedenti, fotogrammi precedenti, da «illuminarsi in sequenza». [18](#)

Non c'è dubbio che in ogni istante di tempo il cervello abbia ricordi degli istanti precedenti. Come abbiamo visto nel [Capitolo 6](#), il cervello è un sistema dinamico che codifica ciascun evento nel contesto di quelli che lo hanno preceduto: se così non fosse, non

sarebbe possibile intendere il linguaggio, giacché il significato di ciascuna parola deve essere interpretato alla luce delle parole antecedenti (e talvolta, come vedremo nel [Capitolo 12](#), alla luce di quelle successive). Nondimeno, anche se il cervello accede ai fotogrammi precedenti dall'interno del fotogramma attuale, trovo implausibile l'idea che lo scorrere del tempo sia un'illusione. In effetti, è ben lungi dall'essere chiaro se questa soluzione degli *istanti-all'interno-di-un-istante* del paradosso dell'universo-blocco/flusso del tempo sia compatibile con le neuroscienze.

L'universo-blocco è compatibile con le neuroscienze?

Il cervello è una fabbrica di illusioni, e probabilmente la maggior parte dei neuroscienziati e degli psicologi sottoscriverebbe l'affermazione che la nostra sensazione soggettiva dello scorrere del tempo è un'illusione. Dunque bollare il fluire del tempo come un trucco della mente non è irragionevole. Il problema, però, è che il termine *illusione* può significare cose diverse in fisica e nelle neuroscienze. Quando un fisico suggerisce che lo scorrere del tempo è un'illusione, sta suggerendo che esso esiste solo nella nostra mente e che non è una proprietà

del mondo esterno. Quando un neuroscienziato afferma che la nostra sensazione soggettiva del passaggio del tempo è un'illusione, sta suggerendo che, come tutte le esperienze soggettive, essa è sì un costrutto mentale, ma un costrutto che rappresenta, benché in maniera infedele, un fenomeno fisico che *esiste* nel mondo esterno.

Il cervello è un prodotto dell'evoluzione, e il successo evolutivo è un test piuttosto probante della capacità di un animale di cogliere implicitamente e di sfruttare le leggi fisiche (o almeno un loro sottoinsieme). Il volo del martin pescatore, ad esempio, sarebbe impossibile senza la capacità del suo sistema nervoso di

utilizzare le leggi di Newton: oltre ad applicare i principi dell'aerodinamica per controllare il proprio volo e la velocità di un tuffo, il martin pescatore deve compiere dei calcoli mentali che gli permettano di far coincidere la propria posizione con quella prevista del pesce che intende catturare. Per giunta, la sua vista potrebbe non comunicargli l'effettiva posizione del pesce, a causa della rifrazione subita dalla luce nel passaggio dall'aria all'acqua; e, in effetti, alcuni animali sono in grado di compensare questo effetto ottico.[19](#)

Il punto è che il sistema nervoso è molto ben sintonizzato con le leggi

fisiche. Ciò vale non solo per il controllo motorio – si pensi a una ginnasta che esegue un doppio salto teso con avvitalamento – ma anche per le nostre esperienze mentali soggettive. Le nostre percezioni dei colori, della musica e degli odori sono esempi di costrutti mentali soggettivi, o *qualia*. Sono illusioni, nel senso che non esistono nel mondo esterno, ma possiedono un valore adattivo poiché ciascuna di esse è correlata a fenomeni fisici reali: rispettivamente, la lunghezza delle onde elettromagnetiche, determinate configurazioni delle onde sonore e la struttura chimica delle molecole. Ciononostante, non vi è nulla di intrinsecamente «azzurro» nella

radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda pari a 470 nm, né vi è qualcosa di intrinsecamente marcio nelle molecole di zolfo; di fatto, animali e persone differenti possono trovare lo stesso odore repellente, neutro oppure gradevole.

Per comprendere il potenziale valore adattivo delle nostre esperienze soggettive, ritorniamo all'illusione più intima di cui il cervello dota la mente: la *consapevolezza corporea*. Come illustrato nel [Capitolo 4](#), se qualcuno vi desse una martellata sul dito provereste un dolore lancinante, ma la cosa stupefacente è che, sebbene si generi all'interno del cervello, il dolore non è

localizzato nel cervello. In qualche modo viene invece proiettato nel mondo esterno, nel luogo esatto in cui si dà il caso che si trovi il pezzo di carne che coincide con la vostra mano. Il cervello è talmente impegnato a fornire un'illusione di possesso delle ossa, dei muscoli e dei nervi che formano i nostri arti, che a volte continua a generare questa illusione anche quando l'arto è stato amputato. Il dolore è dunque un'illusione, nel senso che è un costrutto mentale. Eppure, quando avvertite un dolore proiettato sul dito, nessuno suggerisce che il martello sia un'illusione, o che non vi abbia colpito il dito. L'illusione della consapevolezza corporea non è pertanto un'illusione

gratuita: esiste una correlazione molto forte fra gli eventi esterni (il martello che vi colpisce il dito) e le esperienze soggettive interne (il dolore). Quale modo migliore per proteggere il nostro patrimonio fisico più importante che dotare il cervello della capacità di *sentire* dolore? La consapevolezza corporea è l'integrazione suprema fra la mente e il corpo, l'interfaccia fra un calcolatore e i suoi dispositivi periferici più sofisticata che sia mai stata costruita.

Ora che abbiamo meglio compreso le due accezioni della parola *illusione*, e il nesso potenziale fra l'esperienza soggettiva e i fenomeni fisici,

esaminiamo due argomenti contro l'idea eternalista che il flusso del tempo sia un costrutto mentale di un fenomeno fisico che non esiste.

L'evoluzione Se viviamo in un universo presentista dove il tempo fluisce realmente, possiamo immaginare numerosi motivi per i quali potrebbe essere adattivo avvertire soggettivamente questo fluire. Come le nostre percezioni consce dei colori e del dolore sono adattive perché correlate a eventi importanti del mondo esterno, forse il nostro senso dello scorrere del tempo è adattivo perché si correla a eventi che avvengono effettivamente nel mondo. Il nostro senso soggettivo del

passaggio del tempo ci permette non solo di assistere al tuffo di un martin pescatore, ma anche di prevedere, ripercorrere e simulare nella mente tutti gli eventi esterni che si manifestano nel tempo. Forse la sensazione del fluire del tempo è determinante anche per la nostra capacità di proiettarci nel futuro remoto e di intraprendere viaggi mentali nel tempo ([Capitolo 11](#)). Ma se, viceversa, viviamo in un universo eternalista dove lo scorrere del tempo non è un fenomeno reale, in che modo percepire questo scorrere risulterebbe evolutivamente vantaggioso? Naturalmente non tutti i tratti biologici procurano necessariamente un beneficio evolutivo, ma nella maggior parte dei casi ciò

avviene, in particolare quando i tratti hanno l'importanza e l'universalità che caratterizzano la nostra sensazione dello scorrere del tempo. L'ipotesi che il nostro senso soggettivo del tempo sia un'illusione mentale nell'accezione più radicale di *illusione* pare suggerire che si tratti di una sensazione gratuita, anziché di un potente adattamento che migliora l'attitudine del cervello a svolgere il suo compito principale: prevedere il futuro.

La coscienza e la dinamica neurale

La soluzione degli *istanti-all'interno-di-un-istante* del paradosso dell'universo-blocco/flusso del tempo presuppone implicitamente che abbia

senso parlare di coscienza racchiusa in un fotogramma. Benché non si conoscano i meccanismi attraverso i quali il cervello genera la coscienza, esistono certamente firme neurali strettamente associate agli stati consci. Per esempio, i mutamenti più evidenti che si verificano mentre il cervello passa dallo stato di coscienza (veglia) allo stato di incoscienza (sonno a onde lente e anestesia), e viceversa, riguardano gli schemi temporali dell'attività cerebrale, e in particolar modo la frequenza delle oscillazioni cerebrali, le quali costituiscono una misura globale della sincronia e del ritmo dell'attività neurale. Il sonno è caratterizzato da oscillazioni cerebrali

lente, mentre la veglia è associata a un'attività neurale asincrona e a rapide oscillazioni cerebrali.²⁰ Nel complesso, il poco che effettivamente sappiamo circa le neuroscienze della coscienza ci dice che quest'ultima è un processo altamente dinamico, e che parlare di coscienza nel contesto di un singolo fotogramma è un po' come stabilire se un gatto è vivo o morto sulla base di un unico fotogramma di un film. L'animale sta respirando? Il cuore sta battendo? Le molecole di ciascuna delle cellule dell'animale sono attivamente impegnate nell'antidoto al Secondo principio della termodinamica che ha prodotto l'evoluzione, ovvero il metabolismo?

Per definizione c'è vita se ci sono cambiamenti metabolici in atto; in assenza di metabolismo, un animale non può essere considerato vivo. Per appurare se un animale è vivo oppure no non ci basta perciò guardare un fotogramma isolato del film, occorre guardare anche quelli precedenti e successivi. La vita, tuttavia, non costituisce un argomento contro l'eternalismo perché, volendo stabilire se un animale è vivo o morto, non è affatto necessario limitarsi a prendere in esame un singolo fotogramma (per emettere il verdetto possiamo attendere di vedere più fotogrammi).²¹ Un'osservazione simile vale per il

paradosso della freccia di Zenone: possiamo dire che una freccia in volo è in movimento se consideriamo porzioni di tempo infinitesimali? In un certo senso la risposta è sì, dato che possiamo definire la velocità istantanea di un oggetto. Ma, a differenza della freccia, all'interno di queste istantanee gli esseri coscienti devono essere consapevoli del proprio «movimento». Perciò la questione è: una singola fetta dell'universo-blocco è in grado di supportare il fenomeno della coscienza, oppure quest'ultimo richiede qualche genere di spessore temporale? In altre parole: la coscienza è qualcosa che può esistere solo «attraverso» le fette temporali, qualcosa di più affine alla

musica che all'immagine statica di un fotogramma cinematografico? Steven Pinker sembra alludere alla difficoltà di spiegare la coscienza all'interno di fotogrammi statici quando afferma: «La materia è estesa nello spazio, ma la coscienza esiste nel tempo, quanto è certo che procede dall'“Io penso” all'“Io sono”». [22](#)

Vedremo che la coscienza non fornisce una narrazione continua né una narrazione lineare degli avvenimenti che si svolgono intorno a noi. Sembra invece generarsi a singhiozzo, e la consapevolezza degli eventi esterni può seguire di centinaia di millisecondi gli eventi stessi. Rimane dunque dubbio se

abbia senso parlare di coscienza istantanea, e se il fenomeno della coscienza sia compatibile con la soluzione istanti-all'interno-di-un-istante del paradosso dell'universo-blocco/flusso del tempo.

Le leggi fisiche non affermano inequivocabilmente che viviamo in un universo-blocco quadridimensionale. L'universo-blocco offre certamente l'*interpretazione* più coerente della relatività ristretta e di quella generale, ma è ammissione comune che anche all'interno della fisica non esista un consenso universale circa la natura del tempo. In tutti i rami della fisica è in atto uno sforzo per giungere a una teoria

coerente della natura del tempo. Esistono differenze fondamentali fra il ruolo che il tempo svolge nella relatività generale e quello che svolge nella meccanica quantistica, il che spiega perché il tempo rappresenti un ostacolo per la creazione di una teoria della gravità quantistica, cioè di una teoria che unifichi la relatività generale e la meccanica quantistica. E certamente non vi è alcuna evidenza sperimentale a sostegno della tesi che il passato, il presente e il futuro siano tutti ugualmente reali. Anzi, sono pochi gli esperimenti ipotizzabili in grado di far pendere la bilancia dalla parte dell'eternalismo piuttosto che del presentismo. L'esperimento più ovvio sarebbe il

viaggio nel tempo: in fin dei conti, qualunque versione di viaggio nel tempo dà per presupposto che viviamo in un universo-blocco.²³ Sia le equazioni della relatività ristretta che quelle della relatività generale ammettono la possibilità di viaggiare nel tempo, ma solo laddove si realizzino condizioni estremamente insolite, se non del tutto impossibili: ad esempio, la comunicazione superluminale nel caso della relatività ristretta²⁴ e i cunicoli spaziotemporali stabilizzati con energia negativa nel caso della relatività generale. Per ora, dunque, benché l'eternalismo appaia l'ipotesi più conciliabile con le leggi della fisica,

non disponiamo di indicazioni sperimentali, e tanto meno di prove, a sua conferma.

Allora la domanda è: le leggi della fisica (o la nostra interpretazione di esse) devono essere rielaborate in modo da poter spiegare la nostra esperienza cosciente dello scorrere del tempo, oppure sono le neuroscienze che devono concepire un modo per giustificare questa sensazione soggettiva? Brian Greene esprime questo dilemma con eloquenza:

La scienza non riesce a dare conto di una caratteristica basilare del tempo, che la mente umana afferra con la stessa facilità con cui i polmoni accettano l'aria, oppure la mente

umana attribuisce al tempo una caratteristica di pura invenzione, una caratteristica artificiale, che quindi esula dalle leggi fisiche? Se mi poneste questa domanda in orario lavorativo, vi risponderai optando per la seconda ipotesi, ma la sera, quando le argomentazioni scientifiche cedono il posto alla routine quotidiana, non riesco a rifiutare del tutto la prima.^{[25](#)}

Capire se lo scorrere del tempo è una finzione creata dalla mente oppure qualcosa che sfugge alle attuali leggi della fisica è un problema straordinariamente complesso, situato all'interfaccia tra la fisica e le neuroscienze. E, come se questo mistero non fosse già abbastanza arduo da risolvere, occorre tenere conto di un ulteriore elemento: le leggi fisiche e il

cervello umano non sono indipendenti fra di loro. Il punto non è semplicemente che il funzionamento interno del cervello umano deve obbedire alle leggi fisiche, ma che la nostra interpretazione di queste ultime è filtrata dall'architettura del cervello umano. Se dobbiamo mettere in discussione l'affidabilità con cui il nostro cervello dà conto di una cosa tanto evidente come il fluire del tempo, non dovremo forse mettere in discussione anche la capacità del cervello di interpretare le leggi fisiche in modo imparziale? Come vedremo nel prossimo capitolo, nel corso dell'evoluzione la specie umana sembra aver sviluppato la capacità di comprendere il concetto di tempo

cooptando i circuiti preposti alla comprensione dello spazio: in altre parole, sembra che sia il cervello stesso a spazializzare il tempo. Ciò solleva una domanda affascinante: gravitiamo verso determinate interpretazioni delle attuali leggi della fisica a causa del modo col quale il cervello rappresenta e pensa il tempo?

10:00

La spazializzazione del tempo nelle neuroscienze

C'è un aspetto della teoria di Einstein che ha un indubbio corrispettivo nell'ambito della psicologia del tempo, almeno per come quest'ultima si manifesta nel linguaggio: la profonda equivalenza fra tempo e spazio.

Steven Pinker

Nel 1928 Albert Einstein prese parte a un convegno interdisciplinare a Davos. Uno dei partecipanti al convegno era l'illustre psicologo svizzero Jean Piaget, che rivoluzionò il campo della

psicologia dell'età evolutiva studiando il modo nel quale i bambini imparano a ragionare intorno a concetti astratti come quantità, spazio e tempo. Riferendosi all'intuizione di Piaget secondo cui nei bambini la capacità di comprendere i numeri, lo spazio e il tempo si sviluppa secondo uno schema ben preciso, Einstein affermò che la teoria di Piaget è «così semplice che solo un genio poteva concepirla».¹

Nel suo libro *Lo sviluppo della nozione di tempo nel bambino* Piaget scrisse: «Questo lavoro è stato stimolato da un certo numero di quesiti gentilmente proposti da Albert Einstein più di quindici anni fa, allorché

presiedette il primo seminario internazionale di filosofia e di psicologia a Davos». Uno dei quesiti era: «La nostra nozione intuitiva del tempo è primitiva o derivata?». In altre parole, la nostra concezione del tempo è innata o acquisita? Evidentemente Einstein dedicava il proprio tempo non solo a pensare alla natura del tempo, ma anche a pensare a come pensiamo al tempo, una questione certo non meno profonda.

I bambini e il tempo

Nei primi decenni del xx secolo la teoria della relatività ristretta di Einstein era in grande voga, e influenzò scienziati appartenenti a un ampio arco di discipline, Piaget compreso. A proposito della dipendenza del tempo dalla velocità, Piaget si chiese se esistesse un parallelo fra la psicologia e la fisica: «L'ipotesi che intendo sostenere è che il tempo psicologico dipende dalla velocità o dai movimenti insieme alla loro velocità»² (il riferimento è alla velocità con cui si muovono gli oggetti o i bambini stessi).

Per cogliere come il tempo viene rappresentato nella mente di un

fanciullo, Piaget chiese a un gruppo di bambini di svolgere una serie di compiti semplici. In uno di tali compiti due lumache giocattolo che si muovevano per alcuni secondi lungo linee parallele. Per esempio, una lumaca blu e una gialla partivano dallo stesso punto e nello stesso momento e si fermavano contemporaneamente, ma la lumaca blu percorreva una distanza maggiore perché si muoveva a velocità maggiore. I bambini di 5-6 anni riferirono erroneamente che la lumaca che aveva percorso il tragitto più lungo si era fermata dopo.³

Gli studi condotti da Piaget e da molti altri dopo di lui dimostrano che i

bambini giungono a padroneggiare il tempo – o almeno a rispondere correttamente ai quesiti sulla durata degli avvenimenti – solo dopo aver compreso i concetti di spazio e di velocità. Ad esempio, quando devono confrontare la distanza, la velocità e la durata dei viaggi compiuti da diversi trenini, i bambini dai 5 a i 9 anni forniscono risposte corrette alle domande sulle distanze e sulle velocità più spesso di quanto non rispondano correttamente alle domande sulle durate. Anche i bambini più grandi commettono spesso degli errori nel valutare la durata del moto di un oggetto. In un esperimento il 42 per cento dei soggetti di età compresa fra 11 e 12 anni arguì

che il trenino che aveva percorso la distanza maggiore ma in un intervallo più breve era quello che aveva viaggiato più a lungo.⁴

Un motivo per il quale i bambini padroneggiano tardi i concetti temporali è che il modo in cui misuriamo e quantifichiamo il tempo è esageratamente complicato. Le unità di tempo sono espresse per mezzo di una gerarchia complessa e arbitraria: i mesi sono composti da un numero di giorni che varia da 28 a 31; in un giorno ci sono 24 ore; in un'ora 60 minuti; e 60 secondi in un minuto (qui non esiste il sistema metrico-decimale). La medesima ora può inoltre essere

espressa in maniera differente: le otto e quarantacinque, le nove meno un quarto e un quarto alle nove sono la medesima cosa, e possono indicare un momento tanto del mattino che della sera. E, come se ciò non creasse già abbastanza confusione, per misurare le ore utilizziamo l'aritmetica modulare: 30 minuti dopo le 8:45 non sono le 8:75.

Dato che il lessico relativo al tempo e le convenzioni che usiamo per misurarlo paiono essere state ideate da qualche maligna entità al solo scopo di gettare confusione nei giovani cervelli, non è particolarmente sorprendente che i bambini afferrino con lentezza i concetti attinenti al tempo. Nondimeno, il fatto che i bambini padroneggino i quesiti

relativi alla velocità prima di quelli relativi al tempo è interessante, dato che in genere definiamo la velocità in relazione ai concetti apparentemente più basilari di spazio e di tempo. Ispirato dalla relatività ristretta, evidentemente Piaget era convinto della preminenza psicologica della velocità. In modo un po' criptico affermò: «Il tempo della relatività non è dunque altro che un'estensione alle grandi velocità e al caso particolare della velocità della luce, di un principio che vale sin dagli stadi più bassi della formazione del tempo fisico e psicologico, a partire dalla genesi del tempo nel neonato». ⁵ Con ciò intendeva suggerire che i

bambini afferrano intuitivamente il concetto di tempo relativo e la sua dipendenza dalla velocità.

Spazio, tempo e linguaggio

Nel [Capitolo 1](#) ho osservato che la «comprensione» che gli animali non-umani hanno dello spazio è più basilare di quella che hanno del tempo. La semplice azione di mettersi del cibo in bocca o di cercare una preda dietro un albero richiede qualche genere di rappresentazione interna dello spazio più sofisticata di quella necessaria a padroneggiare il non-navigabile, monodimensionale dominio del tempo. È ben noto che i topi imparano a percorrere labirinti complessi. Le api non solo si orientano con sicurezza nello spazio compreso fra l'alveare e i fiori, ma addirittura comunicano alle

compagne la posizione di specifiche macchie di fiori. Inoltre, grazie ai loro sensi, gli animali sono in grado di ricavare indizi spaziali, quali la distanza, in modo molto più diretto di quanto non sappiano fare per le informazioni temporali. La dimensione dell'immagine retinica di un serpente, ad esempio, trasmette informazioni sulla distanza a cui si trova il serpente, consentendo così decisioni rapide sul modo di reagire più opportuno. Il sistema nervoso degli animali ha sviluppato mezzi sofisticati per rappresentare le coordinate spaziali – come su e giù, destra e sinistra – prima di sviluppare la capacità di rappresentare in modo esplicito il

continuum temporale di passato, presente e futuro.

Questo approccio alla questione è in accordo con la teoria secondo cui la nostra capacità di comprendere il concetto di tempo sarebbe stata cooptata dai circuiti neurali evolutisi per navigare, rappresentare e comprendere lo spazio.⁶ Come scrive lo psicologo cognitivo Rafael Núñez, «Nel corso degli ultimi quattro decenni gli studiosi hanno progressivamente convenuto che gli esseri umani concettualizzano il tempo principalmente in termini di spazio, un ambito di gran lunga più facile da padroneggiare».⁷

Un elemento abitualmente citato a

conferma di questa teoria è il fatto che, per parlare del tempo, spesso utilizziamo termini spaziali. Il linguista George Lakoff e il filosofo Mark Johnson hanno sostenuto che «l'esperienza del tempo è un genere naturale di esperienza che viene quasi interamente intesa in termini metaforici (mediante la spazializzazione del TEMPO e le metafore IL TEMPO è UN OGGETTO IN MOVIMENTO)». ⁸ In effetti è arduo parlare di durate temporali senza ricorrere ad aggettivi e avverbi spaziali: *È un film molto* LUNGO; *La scadenza è stata* ACCORCIATA . Parimenti, anche per parlare del passato e del futuro ci serviamo di vocaboli spaziali: *In anni* LONTANI *siamo*

stati compagni di squadra; Natale è ormai VICINO.

In inglese o in italiano, quando spazializziamo il tempo, poniamo il passato *dietro* di noi e il futuro *davanti* a noi. Ma, sebbene tutte le lingue adoperino metafore spaziali, il tempo non è sempre spazializzato nello stesso modo. In Aymara, una lingua parlata sugli altipiani della Bolivia occidentale e del Cile settentrionale, il termine che significa «passato», *nayra*, vuole anche dire *occhi* o *vista*, mentre un termine che significa «futuro», *qhipa*, vuole anche dire *dietro*, il che suggerisce che nel concettualizzare il tempo per mezzo dello spazio gli Aymara adottino una prospettiva fundamentalmente diversa

dalla nostra. Rafael Núñez ha comprovato la singolarità della prospettiva spaziotemporale degli Aymara studiando i gesti con i quali essi accompagnano i loro discorsi. I video dei parlanti nativi aymara li mostrano spesso indicare in avanti quando parlano dei “tempi andati”, e fare invece gesti rivolti dietro di sé quando si riferiscono al futuro.⁹ Questa inversione prospettica non è poi così strana come a prima vista potrebbe sembrare. Dopo tutto, sappiamo che cosa è avvenuto nel passato proprio come sappiamo che cosa c’è davanti a noi, dato che siamo in grado di vederlo; è il futuro, e ciò che sta dietro di noi, a essere ignoto.

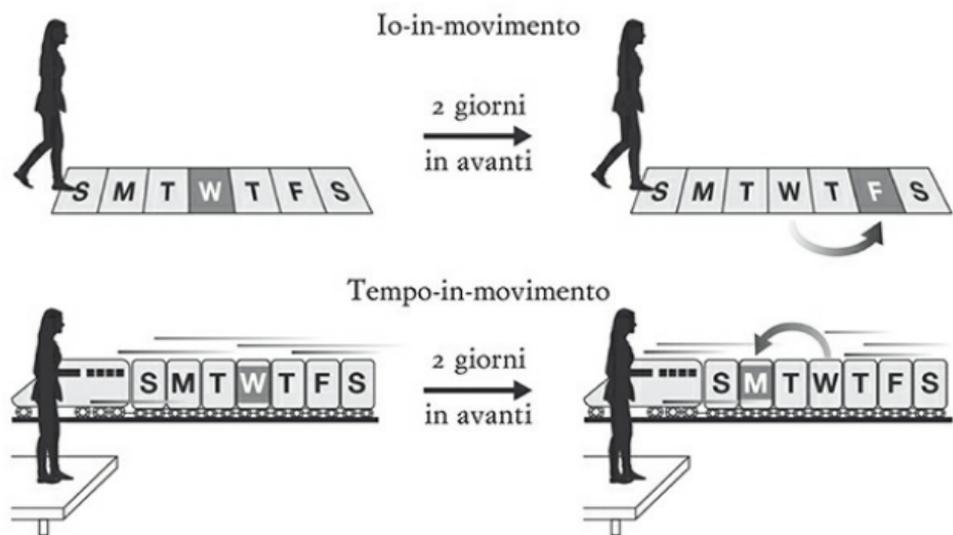
Mercoledì

Anche ammettendo di vivere in un blocco spaziotemporale congelato nel quale il tempo non passa o fluisce, soggettivamente il tempo sembra certamente scorrere. E il linguaggio rispecchia questo fatto, attingendo anche in questo caso al dominio spaziale: *Il tempo* SCORREVA *lento*; *La fine del mondo* si AVVICINA; *Il giorno* è VOLATO. Ma chi o che cosa compie l'azione di scorrere, di avvicinarsi o di volare? Sono io che mi muovo nel tempo oppure io sono fermo mentre il fiume del tempo mi scorre accanto? Dal punto di vista linguistico entrambe le risposte sono corrette.

Ai parlanti inglesi potrebbe essere

capitato di dover interpretare un enunciato del tipo *Next Wednesday's meeting has been moved forward two days* («La riunione di mercoledì prossimo è stata spostata ... di due giorni»): l'enunciato significa che bisogna presentarsi alla riunione lunedì oppure venerdì? L'avverbio inglese *forward* indica di norma uno spostamento nella direzione del movimento. Perciò, se vi state muovendo lungo una linea del tempo statica, il giorno della riunione risulterà spostato a venerdì. Ma se siete fermi, e immaginiamo che il tempo scorra passandovi accanto, spostare in avanti la riunione vorrà dire collocarla più vicina a voi, cioè lunedì. La prima

interpretazione (venerdì) è frutto di quella che viene definita prospettiva dell'io-in-movimento (*ego-moving perspective*), la seconda (lunedì) di quella che è definita prospettiva del tempo-in-movimento (*time-moving perspective*) ([Fig. 10.1](#)).



Le prospettive dell'io-in-movimento e del tempo-in-movimento." />

Figura 10.1

Le prospettive dell'io-in-movimento e del tempo-in-movimento.

Questa ambiguità è l'equivalente linguistico della relatività galileiana: il moto deve essere definito in relazione a qualcosa. Come abbiamo visto, da un enunciato come *La velocità fra voi e il leone è di 10 km/h* è impossibile desumere chi fra voi e il leone si sta muovendo; anzi, nello spazio vuoto non ha alcun senso cercare di stabilire chi si sta muovendo e chi no: tutto è relativo. Nella pratica, tuttavia, è utile sapere se chi si sta muovendo attivamente siete voi o il leone, per cui potremmo chiarire la situazione dicendo che *Il leone sta correndo verso di voi alla velocità di*

10 km/h. È implicito che la sua velocità sia relativa al nostro sistema di riferimento normale, cioè il terreno. Ma, nel caso degli enunciati che riguardano gli spostamenti nel tempo, non esiste un sistema di riferimento normale. Le ricerche dimostrano che, quando a soggetti che parlano inglese viene chiesto in quale giorno cadrà la riunione qualora sia *moved forward* di due giorni, le risposte si dividono quasi esattamente a metà: circa il 50 per cento dei soggetti presume che la riunione si terrà lunedì e il restante 50 per cento che si svolgerà venerdì. L'aspetto affascinante della questione è che queste interpretazioni non sono immutabili.

Risultano infatti dipendere dallo spostamento fisico recentemente compiuto dai soggetti. Per esempio, quando la domanda venne posta a persone che si trovavano in un aeroporto per accogliere qualcuno, il 51 per cento rispose venerdì, ma questo valore salì al 76 per cento nel caso delle risposte fornite da chi era appena arrivato con l'aereo. L'interpretazione è che, avendo appena completato uno spostamento spaziale significativo, i viaggiatori si trovassero in una condizione mentale «io-in-movimento». Altri studi hanno evidenziato che l'effettivo spostamento fisico non è necessario: per modificare la percentuale delle scelte a favore del lunedì o del venerdì può essere

sufficiente stimolare i soggetti a *immaginare* di spostarsi nello spazio.^{[10](#)}

Dal punto di vista linguistico la relazione fra spazio e tempo è asimmetrica. Mentre le metafore spaziali sono spesso impiegate per parlare del tempo, le metafore temporali sono raramente usate per descrivere lo spazio (anche se occasionalmente utilizziamo unità di tempo per indicare distanze spaziali: *Abito a dieci minuti da qui*). Questa asimmetria è stata addotta come prova del fatto che la nostra capacità di concettualizzare il tempo si fonda sulla nostra padronanza cognitiva dello spazio. Di per sé, gli argomenti linguistici non sono tuttavia in grado di

giustificare pienamente una simile conclusione. Forse applichiamo termini spaziali al tempo per ragioni più generali: è possibile che lo spazio sia una fonte universale di metafore, dato che offre un campo più naturale e più ricco da cui attingere. Ricorriamo infatti a metafore spaziali per descrivere praticamente tutto:¹¹ *Ci siamo molto* AVVICINATI *da quando ha preso le* DISTANZE *da suo fratello; I gatti hanno pretese* molto ELEVATE; *Questa mattina mi* sentivo SU, *ma adesso sono di nuovo* piuttosto GIÙ. Risulta però che il legame tra spazio e tempo riguardi un livello più profondo di quello puramente linguistico. A prescindere dalle

metafore o dal linguaggio, lo spazio influenza le modalità stesse con le quali percepiamo il tempo.

Kappa

Immaginate due luci poste a qualche metro di distanza l'una dall'altra. Ciascuna luce viene accesa brevemente, e l'intervallo fra un'accensione e l'altra è di 8 secondi. Vi viene quindi chiesto di tenere premuto un pulsante per il tempo che a vostro giudizio corrisponde a questo intervallo. La domanda è: *la distanza fra le due luci influenzerà la vostra percezione del tempo* (più specificamente, il vostro tentativo di riprodurre l'intervallo percepito)? Una delle prime ricerche a porre questa domanda rivelò che, quando la distanza fra le luci era di 8, 16 e 32 piedi¹² (e l'intervallo rimaneva costante a 8

secondi), le stime temporali medie erano rispettivamente pari a 6,5, 7,15 e 8,05 secondi.¹³ Perciò la risposta è *sì*, lo spazio (la distanza fra le luci) influenza la nostra percezione del tempo. Questo cosiddetto *effetto kappa* è stato riscontrato molte volte e in molti modi diversi. Ad esempio, in un altro studio i ricercatori fecero comparire a turno tre puntini sullo schermo di un computer, uno sulla sinistra, uno al centro e uno sulla destra. I puntini erano distribuiti uniformemente nel tempo: il primo compariva al tempo $t_1 = 0$, il secondo a $t_2 = 0,5$ sec e il terzo a $t_3 = 1$ sec. Ai soggetti veniva chiesto se il primo intervallo ($t_2 - t_1$) fosse più o meno

lungo del secondo ($t_3 - t_2$). Benché i due intervalli fossero identici, le risposte erano fortemente influenzate dalla distanza fra i puntini: se la distanza fra il primo (di sinistra) e il secondo (di mezzo) era maggiore di quella fra il secondo (di mezzo) e il terzo (di destra), era molto più probabile che i partecipanti giudicassero più lungo il primo intervallo.^{[14](#)}

L'effetto kappa dimostra che la distanza spaziale fra due eventi ha un effetto profondo sulla nostra valutazione della quantità di tempo che li separa. La presenza nel nostro cervello di questa relazione fra lo spazio e il tempo trova ulteriore conferma nel fenomeno

inverso. L'aumento dell'intervallo di tempo che intercorre fra le accensioni successive di due luci situate alla stessa distanza l'una dall'altra fa sì che i soggetti aumentino progressivamente le proprie stime di questa distanza (tale illusione prende il nome di *effetto tau*).

Sebbene l'esistenza degli effetti kappa e tau paia indicare l'esistenza di una relazione simmetrica fra lo spazio e il tempo, altri esperimenti suggeriscono invece che vi sia un'asimmetria. Gli studi condotti dalla psicologa Lera Boroditsky dimostrano che in certi casi la distanza influenza i giudizi sulla durata più di quanto le durate influenzino i giudizi sulla distanza. Boroditsky e il suo collega Daniel

Casasanto chiesero agli studenti del MIT di osservare sullo schermo di un computer delle linee che crescevano lentamente in lunghezza. Le linee raggiungevano lunghezze diverse in tempi che variavano da 1 a 5 secondi. Dopo aver osservato ciascuna linea, i partecipanti dovevano riprodurre la quantità totale di tempo durante la quale secondo loro la linea era rimasta visibile *oppure* la lunghezza da essa raggiunta. I risultati mostrarono ancora una volta che, dato il medesimo tempo di permanenza sullo schermo, la stima della durata era fortemente influenzata dalla lunghezza raggiunta dalla linea. Se una linea rimasta sullo schermo per 3

secondi si era molto allungata, i soggetti correttamente valutavano che la sua permanenza fosse stata di 3 secondi, ma, se si era allungata poco, le stime risultavano più vicine a 2,7 secondi.¹⁵

Viceversa, la durata della permanenza sullo schermo della linea ebbe scarsi effetti sulle valutazioni relative alla distanza. Boroditsky ha commentato con dissimulata ironia: «Piaget arguì che i bambini fino a circa nove anni di età non sanno discernere con sicurezza le componenti spaziali dalle componenti temporali degli avvenimenti. Al pari di molti altri risultati della scienza cognitiva contemporanea, l'esito dei nostri esperimenti suggerisce che Piaget

avesse interpretato correttamente il fenomeno osservato, ma si sbagliasse circa l'età in cui i bambini vengono a capo di questa confusione: evidentemente anche gli studenti del MIT non sanno discernere con sicurezza le componenti spaziali dalle componenti temporali della propria esperienza».

Orologio o memoria?

Fra il tachimetro e l'orologio presenti sul cruscotto della vostra auto l'incomunicabilità è totale. Che guidiate a 100 km all'ora o procediate a fatica nel traffico di Los Angeles a una media di 10 km orari, l'orologio dell'auto vi dirà comunque che sono trascorsi 60 minuti (non tenendo conto, naturalmente, degli effetti trascurabili della relatività ristretta). In netto contrasto, l'effetto kappa sembra suggerire che l'orologio cerebrale preposto a misurare i tempi nell'ordine dei secondi sia in qualche modo influenzato dal tachimetro cerebrale, più precisamente dai circuiti neurali che presiedono alla stima delle

distanze. Ma non necessariamente esiste un orologio cerebrale che venga accelerato in occasione dell'effetto kappa; come abbiamo visto in capitoli precedenti, le illusioni temporali possono anche derivare da distorsioni della memoria.

I paradigmi sperimentali adottati per studiare la percezione del tempo richiedono sempre ai partecipanti di stimare uno specifico intervallo temporale *e* di ricordare tale intervallo per poterlo confrontare con altri. Così, se impiegaste una sorta di cronometro neurale per risolvere il primo compito sopra descritto (quello relativo alle due luci che lampeggiano a intervalli di 8 secondi e a distanze differenti), lo

utilizzereste per misurare 8 secondi, memorizzereste temporaneamente tale numero e poi impieghereste nuovamente il cronometro per riprodurre l'intervallo memorizzato. Pertanto l'effetto kappa potrebbe manifestarsi non perché la distanza altera la velocità dell'orologio, ma perché altera la memorizzazione oppure il ricordo dell'intervallo temporale percepito.

Si è ipotizzato che il cervello possieda un sistema polifunzionale preposto all'elaborazione delle informazioni relative alle dimensioni:[16](#) in particolare, che nella corteccia parietale esistano dei circuiti incaricati di elaborare le informazioni concernenti

la quantità, sia essa una quantità spaziale, temporale o numerica. È dunque possibile che le distorsioni temporali provocate dallo spazio siano il risultato di interazioni fra le modalità con cui tali circuiti registrano le informazioni relative alle dimensioni. Per esempio, memorizzare una quantità temporale piccola e una quantità spaziale grande potrebbe far lievitare la quantità temporale. Potremmo considerare questo fenomeno come un effetto di *regressione verso la media*: avere due quantità memorizzate fa sì che ciascuna assuma alcune caratteristiche dell'altra. Si concilia con la tesi secondo cui nel cervello esiste un sistema condiviso di misurazione delle

quantità il fatto che i giudizi temporali non siano influenzati solo dalla distanza: anche la luminosità e le dimensioni di uno stimolo influenzano la percezione della sua durata. Come accennato in precedenza, le ricerche suggeriscono addirittura che, se facciamo lampeggiare su uno schermo un numero basso (ad esempio 1) e uno più elevato (ad esempio 9), i soggetti tendono a stimare che il tempo di permanenza del numero più elevato sia un po' più lungo.¹⁷

Ulteriori riscontri sperimentali comprovanti l'esistenza di un'area cerebrale che rappresenta sia le quantità spaziali che le quantità temporali si riallacciano al concetto di linea mentale

del tempo, cioè all'equivalente mentale della rappresentazione del tempo lungo una delle dimensioni di un diagramma cartesiano (l'asse del tempo di un grafico). Chi fra noi ha avuto il privilegio di un'istruzione scolastica spesso concettualizza il tempo lungo una retta in cui gli intervalli temporali brevi (o il passato) sono collocati a sinistra e gli intervalli più lunghi (o il futuro) a destra. La linea mentale del tempo e la sua relazione con lo spazio si possono evidenziare in vari modi, ad esempio attraverso l'*effetto* STEARC, nome criptico che sta per *Spatial TEmporal Association of Response Codes*. Immaginate di ascoltare una nutrita serie di segnali sonori di diversa durata, dopo

ognuno dei quali dovete indicare, premendo uno fra due pulsanti, se è più breve o più lungo di un intervallo di riferimento. Il risultato di questo compito temporale dipenderà dalla posizione spaziale dei pulsanti! Infatti i soggetti rispondono meglio e più velocemente quando devono indicare la durata breve con il dito indice sinistro e la durata lunga con quello destro, anziché quando il pulsante «breve» è a destra e quello «lungo» a sinistra. In altre parole, è più naturale indicare durate brevi con la mano sinistra anziché con la destra, come se ci fosse una linea mentale del tempo collocata all'interno dei nostri circuiti neurali.¹⁸ Ulteriori

risultati indicanti l'esistenza di una linea mentale del tempo provengono di nuovo dal laboratorio di Lera Boroditsky. Le persone che hanno subito un ictus nella corteccia parietale inferiore destra spesso soffrono di negligenza spaziale unilaterale (*spatial hemineglect*), ossia non sono pienamente consapevoli degli oggetti che si trovano alla loro sinistra. È possibile ad esempio che i pazienti affetti da questa sindrome non mangino il cibo che si trova nella parte sinistra del proprio piatto, o persino che non curino il lato sinistro del proprio viso. Boroditsky e i suoi colleghi hanno dimostrato che i pazienti affetti da negligenza spaziale unilaterale possiedono una ridotta capacità di

collocare lungo una linea mentale del tempo le informazioni riguardanti il passato e il futuro, e che ciò compromette la loro capacità di ricordare il contesto temporale degli avvenimenti.^{[19](#)}

Vi sono inoltre dati comprovanti che lo spazio e il tempo si intrecciano anche al livello più basilare costituito dai singoli neuroni.^{[20](#)} Per esempio, come detto in precedenza, i neuroscienziati registrano da decenni l'attività dei neuroni che rappresentano lo spazio; specificamente, il comportamento delle cellule di posizione dell'ippocampo, che si attivano in maniera preferenziale allorché un animale si trova in un luogo

specifico di una stanza. I risultati più recenti suggeriscono che una piccola percentuale delle cellule dell'ippocampo sia in grado di codificare la distanza che un ratto ha percorso su un tapis roulant: per esempio, un neurone «di distanza» potrebbe attivarsi quando il ratto ha percorso cinque metri, più o meno indipendentemente da quanto tempo è trascorso dall'inizio della sua corsa (o, in maniera equivalente, indipendentemente dalla velocità del tapis roulant). Altre cellule sembrano codificare la quantità di tempo che il ratto ha trascorso correndo sul tapis roulant, ad esempio attivandosi quando il ratto ha iniziato a corrervi sopra da

venti secondi (anche qui, più o meno a prescindere dalla distanza percorsa). La grande maggioranza delle cellule, tuttavia, si comporta in maniera più complicata: il loro schema di attivazione è determinato da un complesso amalgama di posizione, distanza percorsa, tempo trascorso e velocità.

Nel complesso ancora non comprendiamo in quale modo i neuroni dell'ippocampo – o di qualunque altra area del cervello – misurino, rappresentino e memorizzino le quantità spaziali e temporali. È tuttavia chiaro – come indicano i dati linguistici, psicofisici e neurofisiologici – che nei nostri circuiti neurali lo spazio e il

tempo sono effettivamente intrecciati.

La relatività in fisica e nelle neuroscienze

Negli ultimi capitoli abbiamo visto che il rapporto fra lo spazio e il tempo in fisica presenta parallelismi affascinanti con il rapporto fra lo spazio e il tempo nelle neuroscienze.

Per ricapitolare e approfondire questi parallelismi:

Il tempo è relativo Einstein ci ha insegnato che, mentre la velocità della luce è assoluta, il tempo e lo spazio sono relativi: ad alte velocità gli orologi rallentano. Einstein alluse inoltre alla relatività del tempo soggettivo quando, a quanto si narra, affermò: «Un'ora seduti

accanto a una bella ragazza sulla panchina di un parco passa in un minuto, ma un minuto seduti su una stufa bollente sembra un'ora». [21](#) Come abbiamo discusso nel [Capitolo 4](#), la nostra sensazione soggettiva del tempo trascorso è relativa, ma dipende da una moltitudine di fattori, fra cui il contesto, la condizione emotiva, l'attenzione, le caratteristiche dello stimolo (ad esempio la distanza e la velocità) e l'eventuale assunzione di sostanze psicoattive.

Lo spazio e il tempo sono non-indipendenti La relatività ristretta impone un rapporto di condizionamento reciproco fra lo spazio e il tempo:

viaggiare a velocità elevatissime nello spazio fa procedere il tempo a passo di lumaca, mentre stare fermi è il modo «più rapido» per viaggiare lungo l'asse del tempo. Anche dal punto di vista soggettivo lo spazio e il tempo sono interdipendenti. L'effetto kappa, ad esempio, fa sì che, quando due eventi separati dallo stesso intervallo temporale vanno distanziandosi nello spazio (rispecchiando dunque velocità più elevate), tendiamo a giudicare tale intervallo temporale più lungo. [22](#)

La relatività della simultaneità Una delle conseguenze più sbalorditive della relatività ristretta è che due eventi che dal mio punto di vista sono simultanei

non sono tali dal punto di vista di un soggetto che sia in moto relativo rispetto a me; in altre parole, la simultaneità è relativa. Anche se non ne abbiamo ancora trattato, la simultaneità è relativa anche dal punto di vista soggettivo. Per esempio, a causa dell'enorme differenza di velocità fra la luce e il suono, i segnali visivi e uditivi del medesimo evento arrivano ai nostri organi di senso con ritardi differenti. Eppure, quando ascoltiamo un concerto dal loggione, abbiamo l'impressione di vedere e udire simultaneamente i piatti sbattere, benché il suono ci giunga con un ritardo di circa 100 millisecondi. Nel [Capitolo 12](#) vedremo che, nell'intento di creare una narrazione appropriata degli eventi che

si svolgono nel mondo che ci circonda, il cervello si prende la libertà di manipolare la nostra percezione della simultaneità.

Per parte sua, Piaget era affascinato da questi parallelismi. Egli appariva convinto che esistesse un legame profondo tra la nozione di tempo intrinsecamente relativa di un bambino e il tempo relativistico di Einstein.²³ Ma qualsiasi apparente analogia fra la relatività ristretta e la nostra percezione del tempo è appunto questo: una semplice analogia. L'interdipendenza fra spazio e tempo nella fisica ci rivela qualcosa di profondo intorno all'universo, ma non ci dice nulla

intorno alla psicologia del tempo. Il fatto che la distanza possa influenzare le nostre valutazioni temporali non ci rivela nulla riguardo alla reale natura fisica dello spazio e del tempo, ma ci svela qualcosa di profondo riguardo all'architettura del cervello.²⁴ Che cosa esattamente? Esistono senza dubbio molteplici risposte a questa domanda. Una è che dal nostro primo al nostro ultimo respiro il cervello campiona di ciò che vediamo, udiamo e proviamo, e utilizza qualunque schema gli riesca di rintracciare per dare un senso al mondo che ci circonda. Si consideri l'immagine della [Figura 10.2](#):

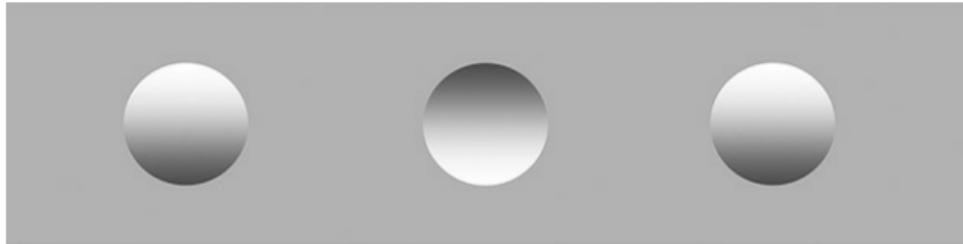


Figura 10.2

Illusione concavo-convesso. Vediamo il cerchio centrale col bordo scuro in basso come convesso (sporgente dalla pagina) e i cerchi ai lati con i bordi scuri in alto come concavi perché il cervello presuppone che la luce provenga dall'alto.

Dei tre cerchi, quello che presumibilmente fornisce l'illusione di essere convesso – di sporgere cioè fuori dalla pagina – è quello centrale, mentre i cerchi ai suoi lati danno l'impressione di essere concavi, cioè di essere buchi scavati nella pagina (se capovolgete la pagina vedrete che i cerchi differiscono

soltanto per la loro orientazione, e che ora è il cerchio centrale ad apparire concavo). Questa illusione è una conseguenza del fatto che, dal giorno in cui siamo nati, il nostro sistema visivo sottopone a campionamento i propri dati di esperienza: la luce in genere proviene dall'alto, per cui una gobba nel muro getterà l'ombra sulla propria metà inferiore, mentre un buco produrrà l'ombra lungo il proprio margine superiore.

Così come per inferire una determinata forma tridimensionale si serve delle informazioni sulle fonti luminose che ha precedentemente incamerato, il nostro cervello si serve delle proprie esperienze passate per

compiere inferenze relative al tempo e allo spazio. Possediamo tutti una vasta banca dati osservativa su oggetti e animali che si muovono nello spazio e nel tempo, in genere con una gamma di velocità piuttosto ristretta. Perciò sappiamo che la distanza e il tempo sono correlati: un bambino che guarda una goccia di pioggia scivolare giù dalla finestra è in grado di notare che più il tempo passa, più aumenta la distanza percorsa dalla goccia. Gli orologi del cervello sono tutt'altro che perfetti e, in mancanza di un orologio perfetto, per guidare le nostre valutazioni facciamo ricorso alle esperienze pregresse. Di fatto il grado di influenza che

informazioni non pertinenti, quali la distanza fra due luci che lampeggiano, esercitano sulle decisioni temporali è relativamente ridotto, ed è grosso modo paragonabile all'accuratezza degli orologi cerebrali. Tutto ciò significa che se nel cervello avete un cronometro non accurato, e se dovete confrontare le durate dei viaggi compiuti da due trenini giocattolo, ha senso formulare delle stime che prendano in considerazione la distanza percorsa da ognuno di essi.²⁵

Sospetto che nei nostri circuiti neurali lo spazio e il tempo siano intrecciati per almeno due motivi. In primo luogo, come l'evoluzione stessa, il cervello ha un *modus operandi* molto

opportunistic: è cioè costantemente impegnato a mutuare e a riciclare elementi preesistenti. È probabile che la nostra capacità di comprendere la nozione di tempo sia stata conseguita cooptando i circuiti evolutisi per navigare e concettualizzare lo spazio. In secondo luogo, il cervello è abilissimo a desumere informazioni dalle configurazioni del mondo esterno e, poiché gli intervalli spaziali e temporali sono fortemente correlati, utilizza le distanze per ottimizzare le proprie stime temporali.

Nell'eternalismo il mondo è spazializzato: tutti i momenti del tempo sono dispiegati e congelati all'interno

dell'universo-blocco, da cui discende che il fluire del tempo è un'illusione creata dalla mente. Ma non potrebbe essere il contrario? Non potrebbe darsi che l'architettura del cervello condizioni l'interpretazione delle leggi fisiche?

Il fisico Lee Smolin suggerisce che la progressiva spazializzazione del tempo in fisica abbia condizionato la nostra concezione della natura del tempo: «La capacità di congelare il tempo [...] è stata di grande aiuto alla scienza perché ci ha liberato dalla necessità di osservare il moto in tempo reale [...] Ma, al di là della sua utilità, questa invenzione ha profonde conseguenze filosofiche, perché appoggia la tesi che il tempo sia un'illusione. Il metodo del

congelamento del tempo ha funzionato così bene che la maggior parte dei fisici non è consapevole del fatto che la propria capacità di interpretare la natura è vittima di un trucco». [26](#)

Ora che sappiamo che il cervello stesso spazializza il tempo, vale la pena di domandarsi se il consenso di cui gode l'eternalismo abbia tratto vantaggio dalla sua consonanza con l'architettura dell'organo a cui spetta la scelta fra eternalismo e presentismo. [27](#) In altre parole, visto che abbiamo sviluppato teorie e metodi matematici per rappresentare il tempo come una dimensione simile allo spazio, è possibile che ci troviamo più a nostro

agio con l'eternalismo anziché con il presentismo a causa del modo in cui il cervello concettualizza il tempo. È difficile rispondere a questa domanda, ma, come stiamo per vedere, la mente umana abita effettivamente in un universo eternalista: dal punto di vista mentale, non solo il passato e il futuro esistono, ma sono valide destinazioni di viaggio. In effetti una delle caratteristiche che definiscono la nostra specie è la sua incessante tendenza a saltellare con la mente avanti e indietro nel tempo.

11:00

Il viaggio mentale nel tempo

Essere immortali è banale; tranne l'uomo, tutte le creature sono immortali, perché sono ignare della morte.

Jorge Luis Borges

L'11 marzo del 2011 un terremoto di magnitudo 9 provocò un enorme tsunami che colpì la costa settentrionale del Giappone. Circa 15 000 persone rimasero uccise e centinaia di migliaia persero la propria abitazione. Nel corso delle successive operazioni di bonifica furono numerose le segnalazioni di

“pietre dello tsunami”: grandi pietre situate in alcune delle zone devastate, sulle quali secoli prima erano stati incisi avvertimenti come «Non costruite le vostre case al di sotto di questo punto!»¹

A questi avvertimenti fu dato ascolto oppure no a seconda dei casi e dei luoghi. Ma gli incisori delle pietre avevano chiaramente in mente il futuro remoto, e immaginavano che un giorno persone come loro si sarebbero trovate di fronte al problema di decidere dove costruire la propria abitazione. Gli incisori si rivolgevano ai posteri e offrivano consigli basati sulle proprie tragiche esperienze.

Gli psicologi Thomas Suddendorf e

Michael Corballis hanno ribattezzato *viaggio mentale nel tempo* la nostra capacità di proiettarci mentalmente nel futuro.² E, come osservato nel [Capitolo 2](#), la nostra capacità di lavorare una pietra trasformandola in un utensile, di piantare un seme per garantirci cibo nel futuro, di costruire una capanna, di lavorare per trarre uno stipendio o di risparmiare in vista della pensione dipende dalla nostra capacità di immaginare differenti scenari futuri e di capire che, agendo nel presente, possiamo plasmare l'avvenire. La facoltà di viaggiare mentalmente nel tempo, per citare di nuovo lo psicologo Endel Tulving, «comportò un radicale

mutamento della relazione che gli esseri umani avevano con la natura. Anziché usare il proprio intelletto per adeguarsi ai capricci naturali – con le incertezze che ciò comporta in ordine ad esempio alla disponibilità di cibo e di rifugi e alla protezione dai predatori – gli esseri umani cominciarono ad affrontare in anticipo questi problemi e ad adottare misure per mitigarne l'imprevedibilità». [3](#)

Molti psicologi, compresi Endel Tulving e Thomas Suddendorf, reputano che il viaggio mentale nel tempo sia un'abilità cognitiva peculiarmente umana; di più, che sia una caratteristica essenziale degli esseri umani.

Rivisitare e previsitare

Ricordo che da bambino stavo camminando lungo la riva del lago situato nel Roger Williams Park. Era inverno e alcune zone del lago erano ghiacciate. Mentre stupidamente ne stavo saggiando la consistenza, il ghiaccio si ruppe e io caddi nell'acqua gelida. La mia capacità di rivivere questo avvenimento si basa su due diversi tipi di memoria: la memoria semantica e quella episodica. La distinzione fra questi due tipi di memoria umana è talvolta equiparata alla differenza fra sapere e ricordare. La memoria semantica si riferisce al sapere: ad esempio, alla conoscenza del

nome del parco, e del fatto che esso si trova nella città di Providence, nel Rhode Island. La memoria semantica include inoltre la conoscenza di fatti ancora più basilari necessari a comprendere la vicenda, ad esempio che l'acqua si può trasformare in ghiaccio e che l'acqua ghiacciata è fredda. La memoria episodica si riferisce invece alla mia capacità di rivivere mentalmente l'episodio, di vedere il ghiaccio con l'occhio della mente, di evocare il contenuto emotivo della sensazione di freddo e di ricordare che, essendo l'acqua poco profonda, mi fu piuttosto facile risalire a riva.

Una distinzione spesso trascurata fra memoria semantica ed episodica

riguarda l'assenza o la presenza di un timbro a data. Sapete che l'acqua può diventare ghiaccio, ma sono pronto a scommettere che non avete idea di quando siete venuti a conoscenza di questa piccola e importante informazione. Forse sapete qual è la capitale del Nepal, ma sapete anche quando avete appreso che è Katmandu? La nostra memoria semantica registra le conoscenze relative al mondo, ma non registra la data in cui una singola informazione è stata acquisita, e neppure il loro ordine di accadimento. Che cosa avete imparato prima? *Che le api producono il miele o che le pecore danno la lana?* Viceversa, al pari della

data associata a ciascun file del vostro computer, i ricordi episodici recano in genere qualche tipo di marcatura temporale: anche se non conoscete necessariamente la data esatta di un episodio, sapete all'incirca l'anno in cui si è verificato, l'età che avevate allora, o anche soltanto se esso è accaduto prima o dopo un altro avvenimento memorabile della vostra vita. Se vi ricordate del vostro primo bacio e della cosa più imbarazzante che vi sia mai successa, probabilmente saprete anche quale delle due cose è avvenuta prima (sperando che si tratti di due episodi distinti).

La memoria episodica e la capacità di proiettarci mentalmente nel futuro

dipendono in ampia misura dalla memoria semantica. Sarebbe difficile fare un viaggio mentale nel tempo la cui meta sia un periodo di vacanza su un'isola tropicale senza avere una conoscenza di base della sabbia, del sole, degli oceani e della piña colada. In accordo con l'idea che i ricordi semantici possono fungere da infrastruttura per fissare i ricordi episodici, gli studi sull'età evolutiva suggeriscono che nei bambini la memoria semantica emerge prima di quella episodica. Per esempio, quando vengono loro insegnati dei nomi di colore, i bambini di quattro anni imparano rapidamente ad applicare

queste informazioni prendendo l'oggetto del colore richiesto. Ma se si chiede loro *quando* hanno imparato tali nomi di colore, spesso sostengono di conoscerli da sempre, benché li abbiano imparati da pochi minuti.⁴

Le persone affette dalla cosiddetta *amnesia anterograda* perdono in genere la capacità di immagazzinare nuovi ricordi semantici *ed* episodici, sebbene riescano ancora ad apprendere compiti motori come andare in bicicletta e a fissare altri tipi di ricordi cosiddetti *procedurali* o *impliciti*. I ricordi semantici precedentemente immagazzinati (ad esempio i nomi dei loro famigliari o della capitale della

Francia) rimangono in larga misura intatti, ma alcuni pazienti amnesici manifestano una ridotta capacità di rievocare episodi passati della propria vita (quelli avvenuti prima dell'insorgere dell'amnesia).⁵

Non è sorprendente che chi è affetto da amnesia fatichi a descrivere quello che ha fatto ieri: in fin dei conti è proprio questo ciò che intendiamo parlando di amnesia. Ma le persone amnesiche hanno anche difficoltà a programmare il proprio futuro o a descrivere quello che potrebbero fare domani? La risposta a questa domanda sembra essere *sì*. Le ricerche svolte negli ultimi due decenni hanno infatti

messo progressivamente in luce che alcuni pazienti amnesici hanno difficoltà a proiettarsi sia nel passato che nel futuro. Un paziente di questo tipo, noto con le iniziali K.C., aveva subito estesi danni all'ippocampo in conseguenza di un incidente in motocicletta. Oltre ad aver perso la maggior parte dei propri ricordi episodici, K.C. manifestava una pronunciata difficoltà a concepire il proprio futuro. Ecco un brano di una conversazione fra lui ed Endel Tulving:

ET: Proviamo di nuovo con la domanda sul futuro. Che cosa farà domani?

[Pausa di 15 secondi]

KC: Non lo so.

ET: Ricorda la domanda?

KC: Su che cosa farò domani?

RT: Sì. Come descriverebbe il suo stato mentale quando si sforza di pensarci?

[Pausa di 5 secondi]

KC: Vuoto, direi.⁶

K.C. sicuramente comprendeva i concetti di passato, presente e futuro. Era in grado di disporre gli eventi secondo il loro ordine di accadimento, e sapeva che suo fratello era morto. Il deficit di K.C. pare essere in buona parte circoscritto a ciò che Suddendorf e Corballis chiamerebbero viaggio mentale nel tempo. Queste e altre osservazioni sono in accordo con la tesi secondo cui viaggiare mentalmente avanti o indietro nel tempo si basa in parte sulle stesse facoltà cognitive che

utilizziamo per memorizzare e
ricostruire le informazioni
autobiografiche.

Il viaggio mentale nel tempo negli animali

La capacità di proiettarsi mentalmente nel passato o nel futuro è una prerogativa esclusiva dell'*Homo sapiens*? Abbiamo visto che tutti gli animali misurano il tempo e per loro natura anticipano gli eventi esterni: imparano a salivare in risposta a una campanella che suona prima dell'arrivo del cibo e sono in grado di svegliarsi prima del sorgere del sole per mettersi alla ricerca di cibo. Sappiamo anche che certi animali sembrano fare preparativi deliberati in vista del futuro: gli uccelli costruiscono i nidi, i castori edificano dighe per proteggere le loro tane e gli

scoiattoli fanno provvista di frutti secchi. Ma questi comportamenti implicano che gli animali pensino in qualche senso al futuro, o che afferrino il concetto di tempo?

Misurare il tempo certamente non equivale a pensare al futuro: un orologio misura il tempo ma non lo comprende. Inoltre, l'atto di costruire nidi o di raccogliere cibo non comporta che un animale capisca le conseguenze a lungo termine delle proprie azioni. Nessuno suggerirebbe che, mentre è alla ricerca del luogo ideale per ancorarsi e diventare una pupa, un bruco stia pensando fra sé: «Questo è il posto perfetto per trasformarmi in una meravigliosa farfalla». Nella maggior

parte dei casi gli esempi di apparente pianificazione a lungo termine negli animali sembrano in realtà il frutto di istinti innati. Come ha affermato lo psicologo Daniel Gilbert, «Lo scoiattolo che nasconde una noce nel mio cortile “è conscio” del futuro più o meno nello stesso modo in cui una pietra che cade “è conscia” della legge di gravità»: [7](#) in effetti, i giovani scoiattoli che non hanno ancora conosciuto l’inverno provvedono comunque a fare scorta di frutti secchi. Gli animali pongono in atto comportamenti di ogni genere senza comprenderne le ragioni o la rilevanza a lungo termine. Del resto, si ha persino notizia di esseri umani che pongono in

atto comportamenti piuttosto complessi senza darsi granché pensiero di ciò che succederà di lì a nove mesi.

Ma il fatto che molte delle azioni orientate al futuro compiute dagli animali siano innate non vuol dire che gli animali *non possano* intraprendere viaggi mentali nel tempo. In effetti, se ciò avvenga oppure no è oggetto di animato dibattito nella disciplina che studia la cognizione animale e nella psicologia evoluzionistica.

Fra i principali candidati al ruolo di animali capaci di viaggiare mentalmente nel tempo vi sono gli uccelli della famiglia dei Corvidi (ghiandaie, cornacchie e corvi). La psicologa britannica Nicola Clayton è autrice di

molte delle ricerche intese ad accertare se una specie di ghiandaia, la *ghiandaia della Florida* (*Aphelocoma coerulescens*), sia in grado di intraprendere viaggi mentali nel tempo orientati al futuro. La ghiandaia della Florida nasconde in vari luoghi piccole quantità di cibo, che la sua eccellente memoria spaziale le consente di recuperare in momenti successivi. Come detto, di per sé questo comportamento non implica viaggi mentali nel tempo, ma i risultati ottenuti da Clayton grazie a un certo numero di ingegnosi stratagemmi suggeriscono che questi uccelli facciano molto di più che obbedire all'istinto di nascondere cibo.

Le ghiandaie della Florida mangiano sia vermi (larve di tarme della cera) che frutti secchi, ma preferiscono i vermi, almeno quando sono freschi. Quando, ad esempio, viene data loro la scelta fra vermi freschi e arachidi, optano per i primi, ma se la scelta è fra arachidi e vermi morti cinque giorni prima, evitano i vermi e scelgono le arachidi. La domanda allora è: se alle ghiandaie della Florida permettiamo di nascondere sia vermi freschi che arachidi, ma di tornare ai loro nascondigli quattro ore *oppure* cinque giorni dopo, che cosa sceglieranno di recuperare, i vermi o le arachidi? Dopo quattro ore gli uccelli perlustravano con molta maggiore frequenza i siti in cui avevano nascosto i

vermi, mentre si concentravano sui nascondigli delle arachidi quando era loro consentito di ritornare solo dopo cinque giorni (per far sì che gli uccelli non basassero le proprie scelte su eventuali odori provenienti dai nascondigli, prima della fase di recupero i ricercatori sottraevano sempre il cibo che vi era nascosto). Per esempio, nel gruppo delle quattro ore l'83 per cento dei primi recuperi riguardò i nascondigli dei vermi, mentre tale valore scese a zero nel gruppo dei cinque giorni. In altre parole, gli uccelli parevano essere consapevoli che dopo cinque giorni i vermi avrebbero raggiunto la loro data di scadenza.

In un altro esperimento, Clayton e colleghi sfruttarono il fatto che le ghiandaie della Florida sono notoriamente dedite ad attività criminali. Se hanno visto una loro consimile nascondere del cibo, è possibile che successivamente lo rubino. Come contromossa, può accadere che chi teme di subire un furto trasferisca il proprio cibo in un altro nascondiglio. Clayton e colleghi dimostrarono che, quando una ghiandaia della Florida sa di essere osservata, vi sono maggiori probabilità che torni al nascondiglio e nasconda le provviste altrove rispetto al caso in cui ha nascosto il cibo al riparo da sguardi indiscreti. Anche questo comportamento

fa pensare a un viaggio mentale nel tempo, poiché si potrebbe arguire che le ghiandaie stanno immaginando uno scenario futuro in cui un malfattore ruba loro il cibo. Questo e altri esperimenti collegati hanno portato Clayton a ipotizzare che questi uccelli compiano autentici viaggi mentali nel tempo orientati al futuro.⁸

All'interno del regno animale le ghiandaie della Florida non sono le uniche autorevoli candidate al ruolo di viaggiatrici mentali nel tempo. Esistono infatti ricerche che si sono domandate se le scimmie antropomorfe (scimpanzé, bonobo, gorilla e oranghi) manifestino ciò che noi chiameremmo lungimiranza.

Una strategia per capirlo consiste nell'appurare se le scimmie antropomorfe sono in grado di imparare a servirsi del denaro. Uno studio scelse come soggetti alcune scimmie che avevano precedentemente imparato a «spendere» dei buoni in cambio di cibo: avevano cioè appreso che gli addestratori accettavano buoni validi, ad esempio un pezzo di tubo colorato in PVC, cedendo in cambio del cibo; altri buoni, invece, erano privi di valore. Nell'esperimento sulla «lungimiranza» le scimmie appresero inoltre che, dopo aver avuto accesso a un insieme di buoni, dovevano attendere per trenta minuti in una sala, dopodiché avrebbero avuto la possibilità di cedere i buoni in

cambio di cibo. Gli sperimentatori si chiesero perciò di quanti di tali buoni si sarebbero impadronite le scimmie prima di essere spostate nella sala d'attesa. Sei degli otto animali coinvolti nell'esperimento afferrarono un numero di buoni validi maggiore di quello che avevano preso in una condizione di controllo nella quale non avevano la possibilità di scambiarli. Gli oranghi fecero meglio dei bonobo, i quali a loro volta fecero meglio degli scimpanzé. Nel complesso, sembra che almeno alcune scimmie antropomorfe siano abbastanza lungimiranti da afferrare il portafoglio prima di uscire per andare a fare la spesa⁹(una performance che in

certi giorni è migliore della mia).

Alcuni scienziati non sono però convinti che questi risultati dimostrino che le scimmie compiono viaggi mentali nel tempo. Forse le scimmie imparano ottusamente una sequenza di azioni secondo un meccanismo cognitivo simile (benché molto più complesso) a quello che è all'opera nei ratti quando imparano a premere una leva per ottenere cibo. Inoltre gli effetti osservati spesso sono deboli: ad esempio, negli studi sugli uccelli e sulle scimmie generalmente accade che non tutti i soggetti «ci arrivino». Ciononostante tali studi forniscono dati persuasivi a favore della tesi secondo cui alcuni animali sono in grado di adattare flessibilmente

il proprio comportamento in modo da soddisfare bisogni futuri. Ma se gli animali siano effettivamente capaci di compiere autentici viaggi mentali nel tempo oppure no è una questione destinata a rimanere oggetto di dibattito finché non disporremo di una definizione universalmente accettata di viaggio mentale nel tempo, o di un test condiviso in grado di appurarne l'effettiva esistenza.

Vivere nel presente

Che i nostri parenti più prossimi siano capaci di fare viaggi mentali nel tempo oppure no, è comunque indubitabile che, se li confrontiamo in base alla capacità di pensare al futuro e di pianificarlo, esseri umani e scimmie sono separati da un abisso. Ha scritto la primatologa Jane Goodall: «Gli scimpanzé sono capaci di imparare la lingua dei segni ma, allo stato brado, per quanto ne sappiamo, non sono capaci di trasmettere informazioni su cose che non siano presenti. Non sono in grado di insegnare ciò che è accaduto cento anni fa, o dieci anni fa, se non manifestando paura in corrispondenza di determinati

luoghi. Certamente non sanno fare progetti da qui a cinque anni». [10](#)

Gli esseri umani non solo si trasmettono informazioni circa gli eventi passati e fanno progetti per il futuro, ma saltano avanti e indietro lungo la linea mentale del tempo per esprimere complesse relazioni di tipo temporale. Consideriamo la frase seguente: *Il mese scorso un predicatore ha detto che mancavano tre mesi alla fine del mondo, perciò il mese prossimo spenderò tutti i miei risparmi.* Senza il lusso del linguaggio e la capacità di svolgere semplici operazioni aritmetiche, come potrebbe un qualunque animale comprendere idee tanto

complesse dal punto di vista temporale?

Alcuni dati a suffragio dell'ipotesi che esista un'un'interdipendenza fra linguaggio, numeri e viaggio mentale nel tempo provengono dallo studio di una remota tribù di cacciatori-raccoglitori indigeni dell'Amazzonia: i pirahã. La loro lingua possiede il tempo passato e quello futuro ma non la struttura grammaticale necessaria a esprimere relazioni temporali «incassate» del tipo *fra un mese avrò speso tutti i miei risparmi* (qui il futuro anteriore *avrò speso* si riferisce al passato dalla prospettiva di un momento futuro).

I pirahã possiedono un sistema di numerazione *uno-due-molti*: le quantità superiori a due sono semplicemente

indicate come «molti». Sanno distinguere fra insiemi poco o molto numerosi (ad esempio fra un gruppo di cinque e un gruppo di dieci oggetti), ma hanno difficoltà a creare un insieme che sia dotato dello stesso numero di oggetti di un insieme dato: se vengono loro mostrate quattro batterie AA e si chiede loro di posare sul tavolo un uguale numero di noci svolgono il compito con discreta precisione, ma se gli oggetti sono dieci generalmente compiono degli errori. Dato il loro sistema numerico uno-due-molti, non è sorprendente il fatto che non paiano avere un'idea precisa della propria età.^{[11](#)}

Il linguista ed ex missionario Daniel

Everett ritiene che i pirahã siano radicati nel presente: «I pirahã non fanno provviste di cibo, non fanno progetti che vadano oltre il domani, non parlano del futuro o del passato remoti: sembrano concentrarsi essenzialmente sull'adesso». ¹² Il proposito originale di Everett era quello di imparare il pirahã, tradurre la Bibbia in tale lingua e convertire i pirahã al cristianesimo. Acquisì in effetti un'ottima padronanza della loro lingua, ma le sue aspirazioni missionarie fallirono clamorosamente, dal momento che la convivenza con i pirahã lo condusse all'ateismo. Everett ritiene che il suo insuccesso sia parzialmente da addebitare al

disinteresse e allo scetticismo che i pirahã dimostrano nei confronti di fatti che non hanno vissuto direttamente, o di cui hanno solo una conoscenza di seconda mano: manifestarono infatti scarso interesse per le vicende di Gesù dopo essersi resi conto che Everett non lo aveva mai conosciuto. Analogamente, non paiono preoccuparsi del futuro, o di ciò che eventualmente accade dopo la morte. Everett non crede che la limitata prospettiva temporale dei pirahã derivi da un deficit neurologico ereditario di qualche tipo, poiché i pirahã sono individui intelligenti e mirabilmente esperti nell'arte di sopravvivere nella giungla: «Sono capaci di addentrarsi nella giungla, nudi e senza utensili né

armi, e tornare indietro tre giorni dopo con canestri di frutta fresca e frutta secca, e piccola selvaggina». [13](#)

Piuttosto, secondo Everett, l'esistenza imperniata sul presente dei pirahã è un marchio della loro cultura. Questo vivere alla giornata è certamente reso possibile dall'ambiente in cui vivono e dalla più o meno ininterrotta disponibilità di cibo. Una simile indifferenza nei confronti del futuro non aiuterebbe a sopravvivere nelle culture Inuit, dove resistere agli inverni inclementi richiede una quantità significativa di pensiero anticipatorio e di preparativi per il futuro.

Spedire messaggi nel futuro

Le popolazioni e le culture differiscono enormemente le une dalle altre per la quantità di pensieri e di sforzi che rivolgono all'avvenire, e per la distanza che percorrono nei loro viaggi mentali nel futuro. Tutti conosciamo persone che, un po' come i pirahã, sembrano vivere alla giornata: sono quegli individui che in genere appaiono soddisfatti della propria vita, anche quando sembrano incorrere in difficoltà finanziarie e personali superiori alla media. All'altro estremo dello spettro troviamo coloro i cui pensieri e i cui atti sono costantemente tesi al raggiungimento di qualche

obiettivo a lungo termine.¹⁴

E poi ci sono i visionari, che sognano l'avvenire anticipandolo di decenni o di secoli. Questa capacità di viaggiare nel tempo oltre la durata della vita di un individuo è forse la pietra angolare della cultura umana. Attraverso i racconti popolari, le pitture rupestri, le tavolette di pietra e di legno, e successivamente attraverso i papiri e i libri, l'*Homo sapiens* ha mantenuto viva una conversazione unidirezionale con le generazioni successive.

Lo tsunami verificatosi nel 2004 nell'Oceano indiano mieté 230 000 vittime fra le comunità costiere di quattordici nazioni. I villaggi dei moka

(«zingari di mare»), una comunità indigena di un'isola della Thailandia, andarono distrutti, ma le vittime furono poche o nessuna. Gli anziani della comunità conoscevano infatti delle storie sugli spiriti affamati del mare. Credevano che il ritirarsi del mare (che precede uno tsunami) fosse un segnale della fame marina, e questa credenza spinse i moka a correre sulle alture prima che le onde gigantesche si abbattessero a riva. Secondo i moka lo tsunami si verificò perché «la grande onda non divorava la gente da molto tempo, e voleva di nuovo assaggiarla».¹⁵ Evidentemente i racconti fatti dai sopravvissuti agli tsunami

precedenti erano stati tramandati nel corso dei secoli sotto forma non di noiosi precetti da fissare nella memoria semantica («quando il mare si ritira, corri sulle alture»), bensì di racconti sul mare divoratore visivamente ricchi ed emotivamente coinvolgenti, dunque assai adatti a essere registrati nella memoria episodica.

In definitiva i ricordi semantici ed episodici fissati nei nostri circuiti neurali sono una ricetta per la sopravvivenza. Ma i ricordi dei singoli esseri umani hanno un'estensione e un'attendibilità limitate, e sono infine destinati a sparire nel nulla. Il viaggio mentale nel tempo ci ha permesso di fare sì che le generazioni successive

traggano beneficio da questi ricordi, e di creare dispositivi di memorizzazione esterni grazie ai quali individui che non si troveranno mai faccia a faccia possono trasmettersi le proprie conoscenze. Senza questi comportamenti guidati dal futuro e queste memorie intergenerazionali la cultura, la tecnica e la scienza moderne non esisterebbero.

La miopia temporale

Gli esseri umani sono le uniche creature del pianeta capaci di pensare al futuro remoto e di fare progetti a lunga scadenza. Solo noi piantiamo semi che possono impiegare anni a dare frutti, o costruiamo strutture progettate per durare nei secoli. Eppure, molti dei problemi più gravi che l'uomo moderno (e altre specie) devono affrontare discendono dalla miopia umana.

A livello personale sono una miriade i problemi finanziari e di salute collegati alla miopia temporale. Guai finanziari come una carta di credito in rosso o una pensione insufficiente spesso sono l'effetto di comportamenti miopi: nel

primo caso, spendere denaro che non abbiamo, nel secondo, non accantonare il denaro che sappiamo ci tornerà necessario.¹⁶ Per giunta, cediamo spesso alla gratificazione immediata che una dieta poco salutare ci offre, o evitiamo di fare esercizio fisico regolare a scapito del nostro benessere a lungo termine. A livello sociale l'instabilità economica è spesso conseguenza degli stessi vizi che producono i guai finanziari individuali. Al pari degli individui, infatti, i governi spesso non sanno differire le gratificazioni o adottare una politica di sacrifici immediati, scegliendo a volte di contrarre ulteriori debiti anziché di

aumentare le tasse o tagliare le spese. Un debito insostenibile causa tracolli economici che hanno profonde conseguenze di lungo periodo, fra cui la disoccupazione e il collasso dei programmi previdenziali. Anche in assenza di catastrofi economiche i fondi pensionistici pubblici risultano cronicamente sottofinanziati; i motivi sono molteplici, ma alla fine sono tutti riconducibili all'adagio di Mark Twain: «Non rimandare a domani quello che puoi fare dopodomani». [17](#)

Un sintomo cospicuo della nostra miopia temporale a livello sociale è il cambiamento climatico. Anche dopo aver compreso i danni a lungo termine

che i nostri comportamenti arrecano alla salute del pianeta, passare all'azione è arduo. Malgrado la nostra capacità di prevedere il futuro, spesso ci è difficile interessarci di scenari temporali che si prolungano oltre la nostra esistenza.

Come il giocatore perennemente convinto che la prossima mano risolverà tutti i suoi guai, la nostra mancanza di lungimiranza crea un circolo vizioso di azioni miopi le quali non fanno che alimentare i nostri problemi. Forse uno degli esiti più gravi della nostra miopia temporale è il danno che essa procura all'efficacia del processo democratico. Si immagini uno scenario nel quale il cento per cento degli economisti risulti d'accordo nel ritenere che la ricetta per

avere nel lungo termine un'economia sana consiste nell'aumentare le tasse. In occasione delle elezioni chi avrà più probabilità di vincere, un politico che intende applicare la soluzione proposta dagli economisti o uno che promette di tagliare le tasse?

La verità è che, sebbene sia molto superiore a quella di tutti gli altri animali, la nostra capacità di fare progetti a lungo termine non è comunque particolarmente sviluppata. Ciò non dovrebbe destare sorpresa. Il cervello umano è il prodotto di un processo evolutivo durato centinaia di milioni di anni, sicché la maggior parte del nostro bagaglio neurale deriva da animali che,

dal punto di vista cognitivo, vivevano nel presente immediato. Pertanto, come specie, gli esseri umani stanno ancora imparando ad affinare le proprie abilità di recente acquisizione, così da meglio bilanciare il piacere della gratificazione immediata con i vantaggi di quella differita.

Quale opzione scegliereste: ricevere 1000 dollari subito o 2000 dollari fra un anno? Qui non c'è una scelta giusta e una scelta sbagliata, anche se l'economista tipico si sentirebbe in obbligo di farvi notare che un rendimento del 100 per cento annuo è difficile da trovare in giro. La domanda mette in evidenza il classico *trade-off intertemporale*: la gratificazione immediata procurata da

una ricompensa subito disponibile contro la gratificazione differita costituita da una ricompensa maggiore. Scelte intertemporali di questo tipo punteggiano la nostra vita. Devo comperare oggi un televisore all'ultimo grido pagando gli interessi della carta di credito, oppure devo risparmiare per qualche mese finché ho il contante sufficiente per acquistarlo? Devo ancora fare una partita al videogame o tornare a lavorare? Devo spendere di più per acquistare un'automobile ecologica, in modo da dare un minuscolo contributo al benessere delle generazioni future?

Lo *sconto temporale* si riferisce al fatto che il valore soggettivo di qualcosa

diminuisce nel tempo. Mille dollari oggi hanno, in un senso assai reale, più «valore» del medesimo ammontare ricevuto fra un anno. È possibile che fra un anno io non sia più su questa terra, per cui mille dollari fra un anno per me potrebbero avere un valore pari a zero. Per usare un esempio più naturalistico, uno dei nostri antenati che abitavano la savana avrebbe considerato la promessa di un pasto immediato di gran lunga preferibile a quella di un pasto più abbondante alla successiva luna piena, se esisteva la possibilità di morire di fame prima di quella data. Nel corso della maggior parte dell'evoluzione i nostri antenati hanno vissuto in un mondo estremamente insicuro, un mondo

dove la fame, l'assalto dei predatori e le malattie erano minacce costanti. In queste precarie circostanze la sopravvivenza nel breve periodo aveva la precedenza sul lusso relativo rappresentato dalle preoccupazioni circa il futuro. Non stupisce che gli esseri umani rechino in sé una forte predisposizione alla gratificazione immediata.

Il rapporto fra gratificazione immediata e differita è quantificabile domandando agli individui, come nell'esempio sopra citato, di scegliere fra piccole ricompense immediate e ricompense differite di valore superiore. Operando sulle dimensioni delle

ricompense e sui ritardi temporali è possibile calcolare il *tasso di sconto temporale* che caratterizza ciascun individuo in uno specifico contesto. Non sorprende il fatto che il valore di questo tasso vari ampiamente da un individuo all'altro. In un esperimento, per esempio, alcuni soggetti si dimostrarono molto pazienti, dichiarandosi propensi ad aspettare sei mesi per ricevere 25 dollari anziché scegliere di riceverne 20 immediatamente, mentre altri si dimostrarono molto più impulsivi, scegliendo 20 dollari oggi anziché 68 dollari dopo un mese.¹⁸ Numerose ricerche hanno messo in evidenza che i tassi di sconto temporale, misurati

attraverso questi compiti di scelta monetaria intertemporale, sono in rapporto di correlazione inversa con la buona salute, la stabilità finanziaria e l'assenza di abuso di sostanze.¹⁹ In altre parole, chi ha una maggiore probabilità di preferire piccole ricompense immediate a ricompense differite maggiori ha anche una probabilità un po' più elevata di avere problemi finanziari o di salute.

Di fronte all'alternativa fra 100 dollari adesso e 120 dollari fra un mese la maggior parte delle persone sceglie la prima opzione. Sapendo ciò, se entrambe le opzioni fossero posticipate della medesima quantità di tempo, se

cioè la scelta fosse fra 100 dollari fra un mese e 120 dollari fra due mesi, quale opzione pensate che risulterebbe preferita? A rigor di logica, se uno ha scelto 100 dollari subito anziché 120 fra un mese, dovrebbe anche scegliere 100 dollari fra un mese anziché 120 fra due mesi: in entrambi i casi attenderebbe infatti trenta giorni in più per ricevere i 20 dollari aggiuntivi. Ma così non avviene.²⁰ Quando le due opzioni sono spostate nel futuro, le persone diventano più pazienti. Non vale la pena di aspettare trenta giorni per ricevere 20 dollari in più se otteniamo 100 dollari subito, ma vale la pena di farlo se entrambe le ricompense sono collocate

nel futuro. In altri termini, preferiamo le ricompense immediate non perché siamo restii ad aspettare trenta giorni per ricevere 20 dollari in più, ma, presumibilmente, perché ci piace avere le cose subito!

La nostra predilezione per la gratificazione immediata è spesso sfruttata dagli enti finanziari e dagli uffici marketing. L'impiego delle carte di credito, per esempio, frappone un velo fra l'atto di acquistare qualcosa e il fatto di spendere i nostri sudati guadagni. Le ricerche dimostrano che la gente è incline a spendere di più quando paga con la carta di credito anziché in contanti. Uno studio nel quale un gruppo di studenti doveva acquistare dei

biglietti per assistere a eventi sportivi dimostrò che gli studenti erano disposti a pagare il doppio se dovevano utilizzare la carta di credito anziché i contanti.²¹ Inoltre i programmi di fidelizzazione delle carte di credito possono indurre i loro possessori a indebitarsi ancora di più, offrendo loro «ricompense» immediate (miglia aeree, punti o rimborsi in contanti) ogni volta che fanno un acquisto: *più spendi, più guadagni!* (Naturalmente sono i consumatori che alla fine pagano per queste «ricompense»).22

Molti degli sbalorditivi risultati scientifici, tecnici e culturali raggiunti dalla nostra specie sono il frutto della

capacità di intraprendere viaggi mentali nel tempo e di eseguire progetti a lungo termine. Ma molti dei nostri insuccessi personali e sociali sono un riflesso del fatto che tante nostre decisioni sono causate dalla tendenza alla gratificazione immediata.²³ Per fortuna il modo in cui bilanciamo i nostri trade-off intertemporali non è impresso nei nostri geni. La capacità di differire le gratificazioni e di prendere decisioni intertemporali ottimali trae immenso giovamento dalla pratica, dall'istruzione, dalla discussione ragionata, e anche semplicemente dal rivolgere la mente al futuro. Le ricerche dimostrano ad esempio che i tassi di

sconto temporale possono essere estesi – ossia le scelte possono essere rese più meditate – facendo in modo che, mentre elaborano le loro decisioni, gli individui viaggino mentalmente nel tempo. In un esperimento, ai soggetti fu data la facoltà di scegliere fra una serie di opzioni intertemporali diverse (ad esempio,

20 dollari adesso o 60 dollari fra un mese); in alcune prove le opzioni erano accompagnate da un'aggiunta del tipo *vacanza a Parigi*, volta a suscitare immagini mentali di eventi futuri. I partecipanti risultarono meno impulsivi (cioè scelsero più spesso le ricompense differite) nelle prove che inducevano a viaggiare nel tempo anziché nelle prove

di controllo.²⁴ Dunque il viaggio mentale nel tempo può costituire, di per sé, un mezzo per correggere la nostra propensione alla gratificazione immediata.

Il viaggio mentale nel tempo e il cervello

Che cosa rende gli esseri umani così peculiarmente predisposti a viaggiare mentalmente nel tempo? C'è qualcosa di particolare nei loro neuroni? La ragione sta nelle dimensioni del nostro cervello? O forse gli esseri umani possiedono aree cerebrali assenti negli altri animali?

I neuroscienziati si troverebbero in difficoltà se dovessero distinguere un neurone di topo da un neurone umano misurandone la rispettiva attività elettrica. Parimenti, al microscopio i neuroni dei mammiferi appaiono tutti molto simili. Naturalmente il cervello umano spicca per le sue dimensioni, ma

non è il più grande del regno animale. Non sorprende che animali più grandi tendano ad avere cervelli più grandi, e dunque che elefanti e balene abbiano cervelli molto più voluminosi del nostro. Se prendiamo in considerazione la massa corporea, e il rapporto fra cervello e massa corporea, gli esseri umani si distinguono anche in questo caso, ma, ancora una volta, senza ottenere il primato. Gli animali piccoli tendono infatti ad avere cervelli più grandi in rapporto al corpo, sicché persino i topi hanno un rapporto cervello-corpo lievemente superiore a quello degli esseri umani. La primatista è la minuscola tupaia: il suo cervello ha un peso pari a circa il 10 per cento del

peso corporeo totale (circa 200 grammi), mentre nella nostra specie questo valore è intorno al 2 per cento. Ma, una volta effettuate le rettifiche necessarie a tenere conto del fatto che il rapporto fra cervello e peso corporeo non è lineare (il cosiddetto *quoziente di encefalizzazione*), il primato passa agli uomini. Dato il peso del corpo umano, il nostro cervello è infatti oltre 7 volte più grande di quanto ci si attenderebbe sulla base del rapporto fra cervello e massa corporea degli altri vertebrati. I delfini hanno un quoziente di encefalizzazione un po' superiore a 5; gli scimpanzé risultano molto distaccati, con un quoziente di circa 2,5; e i topi fanno

registrare un esiguo 0,5.²⁵

Ci sono pochi dubbi sul fatto che la dimensione del cervello, così come è quantificata dal quoziente di encefalizzazione, contribuisca alle peculiari capacità cognitive degli esseri umani. Ma anche le dimensioni relative di aree cerebrali specifiche, o le specializzazioni all'interno di particolari aree cerebrali, giocano un ruolo importante. Per esempio, rapportate ai rispettivi cervelli nella loro interezza, la corteccia uditiva dei primati e quella dei roditori presentano dimensioni simili; altre aree, invece, sono proporzionalmente più estese nei primati. Una di queste è la corteccia

prefrontale.

La corteccia prefrontale, situata subito dietro la fronte, è un'area cerebrale molto "ben introdotta": si trova infatti in una posizione propizia per origliare, e influenzare, ciò che avviene in molte altre zone del cervello. In proporzione le dimensioni della corteccia prefrontale, che nei primati ha goduto di un'espansione preferenziale, non sono maggiori negli esseri umani che nelle scimmie antropomorfe.^{[26](#)} Alcune evidenze indicano però che la corteccia prefrontale umana si distingue per altri aspetti: ad esempio, i suoi neuroni sembrano ricevere un numero maggiore di sinapsi.^{[27](#)}

Che cosa fa dunque la corteccia prefrontale? A prima vista, le persone che hanno subito lesioni a quest'area del cervello possono apparire del tutto normali: possiedono infatti abilità motorie in larga misura intatte, comprendono i discorsi e parlano in maniera normale. Ciononostante, a seconda dell'esatta localizzazione e dell'ampiezza della loro lesione, manifestano deficit evidenti nelle funzioni cognitive superiori: fra questi, alterazioni della memoria a breve termine, della personalità, dell'attenzione, della capacità decisionale e della capacità di inibire i comportamenti socialmente

inappropriati. Sebbene riescano a seguire le istruzioni e a svolgere molti compiti normalmente, le persone con lesioni prefrontali hanno difficoltà a eseguire progetti articolati e ad adattarsi con flessibilità ai mutamenti.^{[28](#)}

La corteccia prefrontale contribuisce inoltre alla nostra capacità di fare progetti a lungo termine, di differire le gratificazioni e di compiere viaggi mentali nel tempo, sicché chi è affetto da un danno alla corteccia prefrontale non è tipo da accantonare grandi somme in vista della pensione. Servendosi del compito di sconto temporale, una ricerca ha studiato in quale modo chi ha patito una lesione alla corteccia prefrontale

bilanci le ricompense immediate con quelle di lungo periodo. Rispetto ai controlli sani e agli individui che soffrono di lesioni in altre parti del cervello, i pazienti con danno alla corteccia prefrontale sono risultati significativamente più inclini a preferire ricompense immediate rispetto a ricompense differite più consistenti.²⁹

Analogamente, diversi studi condotti con le tecniche di brain imaging indicano che il grado di attività di alcune zone della corteccia prefrontale è correlato all'entità temporale del differimento della gratificazione registrata dai compiti di sconto temporale.³⁰

Anche le analisi condotte mediante

brain imaging su soggetti umani sani suggeriscono che la corteccia prefrontale contribuisca alla nostra capacità di compiere viaggi mentali nel tempo. Ad esempio, l'attività della corteccia prefrontale risulta più intensa laddove ai soggetti viene chiesto di immaginare uno scenario futuro sulla base del nome di una persona e del nome di un luogo che conoscono, anziché quando viene loro semplicemente chiesto di creare delle frasi servendosi di tali nomi. Le ricerche suggeriscono inoltre che la corteccia prefrontale sia più attiva quando ai soggetti viene chiesto di immaginare possibili avvenimenti futuri anziché quando viene loro chiesto di richiamare

alla mente episodi passati della propria vita.[31](#)

Anche se la corteccia prefrontale fornisce un contributo importante al viaggio mentale nel tempo, sarebbe ingenuo sostenere che sia questo il luogo in cui tale attività si svolge. Attribuire un compito specifico a una specifica area cerebrale è un po' come guardare una partita di calcio e chiedersi chi ha il compito di fare goal: difensori e attaccanti hanno certamente ruoli differenti, ma segnare è un fatto di squadra e qualunque giocatore può tirare in porta. Il viaggio mentale nel tempo rivolto al futuro è un compito complicato che richiede l'orchestrazione

di un numero considerevole di funzioni cognitive diverse, fra cui accedere ai ricordi episodici e semantici passati, utilizzare tali ricordi per produrre degli scenari futuri, comprendere la differenza fra passato e futuro, e valutare se l'esito simulato è desiderabile oppure no. Inoltre immaginare gli scenari futuri non basta: dobbiamo anche ricordare ciò che abbiamo immaginato, cioè dobbiamo trarre frutto dalle nostre simulazioni mentali. Se state programmando un'escursione in tenda, per decidere come equipaggiarvi è bene che attingiate ai ricordi di gite precedenti. Ed è anche bene compiere estrapolazioni da questi ricordi per simulare gli scenari più negativi: *che cosa succederebbe se mi*

slogassi la caviglia o se fossi morso da un serpente? Una volta che avete effettuato queste simulazioni – e ammesso che siate ancora decisi a partire – è importante servirsene per predisporre gli opportuni piani di emergenza.

Data la sua complessità cognitiva, c'è da attendersi che un viaggio mentale nel tempo richieda la collaborazione di una serie di aree cerebrali differenti. In effetti gli studi sulle lesioni e quelli basati sul brain imaging evidenziano che, nel viaggio mentale nel tempo, sono coinvolte svariate aree cerebrali. Come abbiamo visto in precedenza, il paziente amnesico K.C. aveva difficoltà non solo

a rievocare gli episodi passati della propria vita, ma anche a pensare al proprio futuro. La principale lesione cerebrale patita da K.C. riguardava i lobi temporali, la struttura che contiene l'ippocampo (si noti che l'aggettivo *temporale* in *lobo temporale* non si riferisce al tempo bensì alle *tempie* o all'osso temporale del cranio, situato accanto alle orecchie). In un esperimento fu chiesto a persone con lesioni al lobo temporale mediale di immaginare, e quindi di descrivere, diversi scenari futuri, ad esempio lo scenario conseguente alla vincita di una lotteria. Rispetto ai controlli sani, di queste ipotetiche esperienze gli amnesici con lesioni del lobo temporale fornirono

descrizioni concise e relativamente povere di particolari.³²

Come spesso accade, compiti cognitivi complessi come viaggiare mentalmente nel tempo non fanno capo a una sola area cerebrale bensì a una rete di sostegno che comprende molte aree differenti, ciascuna delle quali fornisce il proprio specifico contributo. Nel caso del viaggio mentale nel tempo è possibile che i lobi temporali mediali offrano l'accesso a una base di esperienze passate, e che la corteccia prefrontale manipoli con duttilità questi ricordi allo scopo di immaginare e valutare nuovi scenari. È interessante notare che viaggiare mentalmente nel

tempo potrebbe non richiedere la capacità esplicita di misurare il tempo. Come un calendario rappresenta il tempo ma non lo misura (non è un orologio), i circuiti neurali che presiedono al viaggio mentale nel tempo devono rappresentare il passato, il presente e il futuro, ma non hanno necessariamente bisogno di saper misurare in modo attivo il passaggio del tempo.

La capacità degli animali di prevedere i cicli naturali e il comportamento dei predatori, delle prede e dei partner ha costituito un potente adattamento evolutivo. Il viaggio mentale nel tempo è stato il passo

successivo, che ha reso la semplice previsione degli eventi del mondo esterno una tecnologia antiquata. Compiere viaggi mentali nel tempo ha consentito agli esseri umani di passare dalla previsione passiva alla creazione attiva del futuro. Il cibo scarseggia? Creiamo un futuro in cui ci sia abbondanza di cibo per mezzo dell'agricoltura. Non c'è abbastanza acqua per l'agricoltura? Creiamo dighe, canali e sistemi di irrigazione.

Come hanno fatto i nostri progenitori ad acquisire la capacità di proiettarsi mentalmente nel passato e nel futuro? Comprendiamo il concetto di tempo perché siamo in grado di fare viaggi mentali nel tempo, oppure facciamo

viaggi mentali nel tempo perché comprendiamo i concetti di passato, presente e futuro? Le risposte a queste domande difficilmente proverranno dagli studi sugli animali. Le ghiandaie della Florida e le scimmie antropomorfe hanno effettivamente la capacità – che la si chiami viaggio mentale nel tempo oppure no – di guidare le proprie azioni verso esiti futuri desiderabili, ma da questo punto di vista il divario fra gli animali e gli esseri umani è indubbiamente enorme. Se non altro perché è difficile fare progetti per i giorni, i mesi e gli anni a venire senza possedere una comprensione semantica dei giorni, dei mesi e degli anni, o senza

afferrare il concetto di tempo. Il viaggio mentale nel tempo è un tratto cognitivo multidimensionale. È probabile che sia il risultato di numerosi esiti evolutivi convergenti, fra cui la memoria semantica e quella episodica, il linguaggio, il senso dei numeri e la spazializzazione del tempo da cui ha origine la linea mentale del tempo.

Come si è detto in precedenza, viaggiare mentalmente nel tempo è sia un dono che una maledizione. I nostri viaggi nel futuro di solito ci conducono in «luoghi temporali» che consideriamo superiori a quelli attuali, e che spesso ci servono per sottrarci alla presa del presente. Ma, come sottolineano le filosofie orientali, viaggiare nel passato

o nel futuro può impedirci di cogliere il qui e ora come una fonte primaria di felicità e di gioia.³³ Daniel Everett allude a ciò quando scrive: «I pirahã pongono al centro della loro attenzione l'immediato e, in tal modo, eliminano in un colpo solo enormi fonti di preoccupazione, di timore e di disperazione che nelle società occidentali tormentano un numero così grande di noi». Ma se vivere nel presente rende la vita più spensierata, ne concede una quantità molto minore (la vita media dei pirahã è di circa 45 anni, senza tenere conto della mortalità infantile).³⁴

Garantire una scorta continua di cibo,

fornire un riparo permanente, coltivare l'arte e la scienza e prevenire e curare le malattie sono tutti obiettivi che richiedono grandi dosi di lungimiranza e di pianificazione. Sta qui il paradosso del viaggio mentale nel tempo: che sembra essere sia la soluzione che la causa di tutti i nostri mali.

12:00

La coscienza: un legame tra passato e futuro

Secondo una certa data se mai qualcuno scoprisse a che cosa serve l'Universo e perché esiste, esso scomparirebbe all'istante e sarebbe rimpiazzato da qualcosa di ancora più bizzarro e inesplicabile.

Secondo un'altra teoria ciò è già avvenuto.

Douglas Adams

Che cosa vede un neonato quando apre gli occhi per la prima volta? Ammesso che veda qualcosa, è certamente un guazzabuglio di aloni, di

configurazioni e di linee sfocate prive di significato e impossibili da interpretare. Quando voi e io guardiamo il mondo, vediamo invece una ricostruzione coerente e stupefacente della realtà che ci circonda: onde che si infrangono su una spiaggia sabbiosa, marinai pescatori che si tuffano nell'acqua, e persino il nostro riflesso sulla superficie dell'acqua. In genere prendiamo erroneamente per buona questa ricostruzione. Invece, nel migliore dei casi, ciò che percepiamo è in correlazione con il mondo fisico esterno ma non ne è lo specchio fedele. I colori che vediamo, per esempio, non sono che un'interpretazione della lunghezza d'onda della radiazione

elettromagnetica, arbitraria quanto il rapporto che lega le lettere dell'alfabeto ai suoni che assegniamo loro. Nel peggiore dei casi, ciò che percepiamo è una finzione imposta in modo endogeno alla mente: dalle visioni di chi soffre di schizofrenia alle allucinazioni indotte dalle droghe, fino ai sogni che facciamo dormendo. E sono tantissime le cose che non vediamo: i batteri che popolano la nostra pelle, le galassie invisibili nel cielo, i muoni generati nell'atmosfera, la firma infrarossa di chi ci circonda.

La sensazione dello scorrere del tempo – la nostra percezione del cambiamento – è anch'essa un costrutto mentale. Per il neuroscienziato questo

costrutto è correlato alla realtà: percepiamo le onde che si infrangono e gli uccelli che si tuffano in acqua perché *il tempo sta scorrendo davvero*: gli eventi in questione si stanno svolgendo in un universo dove solo il presente è reale. Anche per molti fisici e filosofi lo scorrere del tempo è un costrutto mentale, ma un costrutto privo di corrispettivo nel mondo fisico. Nell'universo-blocco dell'eternalismo la nostra percezione del passaggio del tempo assomiglia di più alle visioni di uno schizofrenico, a qualcosa la cui esistenza è puramente interiore.

Questi due approcci offrono concezioni incompatibili della natura del tempo, ma considerano entrambi la

nostra sensazione del fluire del tempo come un problema cruciale. Risolverlo si rivelerà tuttavia molto arduo, perché il nostro senso soggettivo del tempo si situa al centro di una tempesta perfetta di misteri scientifici irrisolti: la coscienza, la libertà del volere, la relatività, la meccanica quantistica e la natura del tempo.

Schegge di tempo

Supponiamo per un momento che l'universo in cui viviamo sia un universo presentista, nel quale solo il presente è reale. La nostra percezione cosciente del tempo è intrisa di presentismo, dato che la coscienza sembra fornire una cronaca diretta dei fatti che si svolgono intorno a noi. Ma anche questa è un'illusione, nel senso che, mentre il cervello inconscio è impegnato in un continuo processo di campionamento e di elaborazione delle informazioni riguardanti eventi che si svolgono nel tempo, la coscienza si genera invece in maniera altamente discontinua. Le narrazioni del cervello

inconscio sono consegnate alla mente in maniera intermittente.

Ascoltando a teatro un'attrice che recita un monologo, non percepiamo consapevolmente ogni singola sillaba all'interno del flusso del suo discorso. Il significato di frasi ed espressioni si materializza nella nostra mente già pienamente formato.

Individuiamo agevolmente la sillaba *po* quando la udiamo pronunciata da sola, ma non la cogliamo consapevolmente quando udiamo la parola *ippocampo*, né percepiamo in maniera cosciente che *ippocampo* incorpora la parola *campo*. È evidente che il nostro cervello non fornisce un resoconto lineare e puntuale dei fatti

sensibili grezzi che si svolgono nel mondo esterno.

La struttura temporale della coscienza è una versione altamente rielaborata della realtà. Se guardate gli occhi di un'amica chiedendole di muoverli a destra e a sinistra, riuscirete a vedere questi movimenti con facilità. Se ora vi mettete davanti allo specchio e provate a concentrare lo sguardo sui *vostri* movimenti oculari verso destra e verso sinistra, vi accorgerete di non essere in grado di vederli. Questi rapidi movimenti oculari volontari si chiamano saccadi, ed esperimenti più rigorosi di quelli realizzabili guardandosi in uno specchio dimostrano che durante i

movimenti saccadici la vista risulta parzialmente soppressa.¹ Ad esempio, se, nel corso di una saccade, un'immagine viene proiettata su uno schermo per poi essere rimossa prima che abbiate completato il movimento oculare, è probabile che non percepiate l'immagine in maniera cosciente. Il cervello spesso cancella i fotogrammi che compaiono durante i movimenti oculari, precludendone l'accesso alla coscienza. Analogamente, ogni battito di palpebre oscura lo stimolo originale impedendogli di raggiungere il sistema visivo, ma noi non percepiamo in maniera cosciente questi oscuramenti perché il cervello riempie i vuoti

giuntando i fotogrammi che precedono e seguono il battito delle palpebre. È stato stimato che, fra saccadi e battiti di palpebre, ognuno di noi perda nel corso della giornata un'ora intera di informazione visiva, senza tuttavia percepire alcuna lacuna nel proprio flusso di coscienza visivo.²

Ricalibrare il tempo

Il tuono e il lampo sono causati dal medesimo evento, ma li percepiamo separatamente perché la velocità della luce è quasi un milione di volte superiore a quella del suono. Il rumore del tuono raggiunge le nostre orecchie in un momento significativamente successivo a quello in cui i fotoni generati dal lampo raggiungono i nostri occhi. In altri casi, però, il cervello deve non solo elaborare in parallelo i flussi di stimoli provenienti dagli occhi e dalle orecchie, ma anche cercare di allinearli e sincronizzarli. Come detto in precedenza, quando i piatti di un'orchestra vengono fatti risuonare, le

onde luminose e quelle sonore giungono agli occhi e alle orecchie in momenti differenti, ma non sono percepite come processi distinti. La vista e il suono dei piatti che si scontrano sono infatti integrati in un'esperienza unificata, multimediale, prima di essere «recapitati» alla coscienza. Lo stesso vale per il linguaggio. Quando qualcuno pronuncia la parola *mimo* vediamo le sue labbra chiudersi e poi aprirsi per emettere la sillaba *mi*, quindi di nuovo aprirsi e chiudersi per emettere la sillaba *mo*. Anche in questo caso, la vista delle labbra che si aprono arriverà agli occhi un po' prima che il suono arrivi alle orecchie. Il ritardo può essere significativo: la voce di un professore

può impiegare 50 millisecondi per raggiungere la parete di fondo di un'aula universitaria di grandi dimensioni. Analogamente, il rumore di una mazza che colpisce una palla da baseball arriva all'interbase con un ritardo di poco più di 100 millisecondi. Eppure, in genere, percepiamo i movimenti delle labbra e il discorso di un parlante (o la vista e il suono di una mazza da baseball che colpisce una palla) come eventi unificati.

Si potrebbe sospettare che la ragione per cui normalmente non percepiamo il ritardo fra i segnali visivi e uditivi sia che il cervello non ha la risoluzione temporale necessaria per cogliere

differenze di 50 o 100 millisecondi. Ma non è così. Con l'esercizio siamo infatti in grado di individuare ritardi di circa 20 millisecondi fra l'inizio di due segnali uditivi dotati di frequenza differente.³ La ragione per cui non percepiamo a livello conscio il ritardo fra i segnali visivi e uditivi è che il cervello inconscio si impegna meglio che può a fornire un'interpretazione integrata degli eventi. L'intervallo di tempo durante il quale il cervello integra l'informazione visiva e quella uditiva in un percolato unificato è detta, appropriatamente, *finestra temporale di integrazione*. All'interno di questa finestra, in termini soggettivi, il cervello

considera simultanei gli eventi visivi e uditivi. Nel caso del linguaggio le finestre possono superare i 100 millisecondi: ad esempio, raramente notiamo uno sfasamento fra le immagini e il parlato di un film se tale sfasamento è inferiore a 100 millisecondi. Ma la finestra è asimmetrica: se il segnale uditivo *precede* quello visivo di 50 millisecondi, è possibile che i soggetti si accorgano che qualcosa non quadra, mentre ciò non accade se il segnale uditivo *segue* quello visivo di 50 millisecondi.⁴ Un'altra indicazione del fatto che il cervello sta attivamente cercando di allineare i segnali provenienti dalle modalità uditive e

visive è che la finestra temporale di integrazione non è scolpita nella pietra, cioè non è la conseguenza di un ritardo fisso nel sistema visivo (sebbene l'informazione visiva, essendo l'occhio più lento dell'orecchio, impieghi effettivamente più tempo ad arrivare nella corteccia),⁵ ma è adattiva. Le ricerche dimostrano che, dopo aver visto alcune centinaia di lampi di luce – ognuno seguito, dopo 200 millisecondi, da un segnale uditivo –, può accadere che le persone giudichino simultanea una coppia successiva nella quale lampo e suono sono separati da 20 millisecondi. È possibile però che non la giudichino simultanea se prima sono stati mostrati

loro centinaia di lampi di luce *preceduti* da segnali sonori. In altre parole, esponendo sistematicamente le persone a ritardi visivo-uditivi artificialmente lunghi, è possibile modificare la finestra di integrazione temporale, da cui discende che la simultaneità soggettiva è relativa. Basandosi sull'esperienza passata, il cervello si premura di creare una narrazione in cui i segnali visivi e uditivi sono integrati in un singolo evento.⁶

Il fenomeno forse più persuasivo di come la coscienza rifletta una versione della realtà temporalmente riveduta e corretta è quello in cui eventi sensoriali posteriori sono in grado di modificare la

nostra percezione cosciente di eventi anteriori. Il linguaggio ne fornisce un buon esempio. Immaginate di udire le due frasi *Il cavallo si è scucito* e *Il cavallo è morto*. Il significato della parola *cavallo* è individuabile solo al termine di ciascuna di esse. Ma di solito non accade che ci formiamo un'immagine cosciente di una determinata zona dei pantaloni o di un equino, per poi attendere la fine della frase per interpretarla.

L'esempio classico di questa *modifica a ritroso nel tempo* (*backward editing in time*) è rappresentato dall'*illusione del coniglio cutaneo*. Immaginate che qualcuno vi dia due colpetti sull'avambraccio vicino al

polso, e poi, in rapida successione, ve ne dia altri due vicino al gomito. Ciò che i soggetti spesso riferiscono di aver percepito non è ciò che è realmente accaduto. La percezione non è di due tocchi vicino al polso e quindi di altri due vicino al gomito, bensì di quattro tocchi che vi saltellano lungo il braccio: cominciando dal polso su su fino al gomito.⁷ Se qualcuno vi desse due colpetti sul polso senza proseguire, riferireste correttamente di aver sentito due colpetti sul polso. Ma nell'illusione del coniglio il terzo e il quarto colpetto alterano la percezione del punto dove si è ricevuto il secondo colpetto. La morale è che la localizzazione degli

stimoli susseguenti altera la percezione conscia della localizzazione di quelli antecedenti, e che la coscienza non può pertanto essere un resoconto continuo e uniforme del fluire del tempo. Sembra piuttosto che il cervello inconscio sia costantemente occupato a elaborare il flusso di stimoli, e che aspetti il momento opportuno per inviare alla coscienza una narrazione ben rifinita.⁸

I correlati della coscienza

Non sappiamo come il cervello compia queste prodezze temporali, né tanto meno come faccia a generare la coscienza. Ma i tentativi di individuare alcuni dei *correlati neurali della coscienza* (gli schemi di attività neurale che potrebbero essere alla base della percezione cosciente)⁹ hanno fatto registrare dei progressi. Un esperimento tipico è quello che impiega l'elettroencefalografia, cioè la tecnica che consiste nell'applicare degli elettrodi sul cuoio capelluto per registrare i piccoli segnali elettrici che provengono dalla corteccia. Una delle strategie adottate per dare la caccia ai

correlati neurali della coscienza è quella di porre a confronto l'attività elettrica generata da uno stimolo percepito in modo cosciente con i segnali che si generano quando il medesimo stimolo è percepito in modo subliminale, cioè viene avvertito dal cervello ma non affiora alla coscienza.

In laboratorio i ricercatori possono porsi a cavallo della soglia della percezione cosciente facendo comparire per meno di 100 ms uno stimolo, ad esempio una linea inclinata, su uno dei quattro quadranti in cui hanno diviso uno schermo di computer. In un esperimento ai soggetti venne chiesto di indicare rapidamente (se necessario «tirando a indovinare») in quale quadrante

pensavano che lo stimolo fosse comparso, e di dire se avevano effettivamente visto la linea, cioè se l'avevano percepita in modo cosciente. Nelle prove in cui i soggetti rispondevano di no a quest'ultima domanda, cioè riferivano di aver tirato a indovinare, la percentuale delle risposte corrette avrebbe dovuto aggirarsi intorno al 25 per cento. La cosa interessante è che la percentuale risultò invece molto più elevata, il che indica che i soggetti percepivano subliminalmente lo stimolo: il cervello inconscio, in altre parole, sapeva dove compariva lo stimolo, ma non si preoccupava di trasmettere questa

informazione alla mente cosciente. Ora la domanda è: qual era la differenza fra ciò che accadeva nel cervello in occasione delle prove corrette in cui i soggetti riferivano di aver visto lo stimolo (corrette/consapevoli) e ciò che accadeva nel cervello in occasione delle prove corrette in cui i soggetti tiravano a indovinare (corrette/inconsapevoli)? Nei primi 250 ms successivi allo stimolo l'attività elettrica delle prove corrette/consapevoli e corrette/inconsapevoli risultò sostanzialmente identica, per cui – a prescindere dal fatto che i soggetti fossero consapevoli oppure no dello stimolo – non si registrò alcuna percettibile differenza di attività

cerebrale. Ma intorno ai 300 ms si osservò, nel caso delle prove consapevoli, un aumento evidente e generalizzato dell'attività corticale.¹⁰ Questi e numerosi altri studi suggeriscono che i meccanismi neurali alla base della percezione cosciente di uno stimolo si attivano in maniera significativa dopo che lo stimolo è stato avvertito dal cervello. Come spiega il neuroscienziato francese Stanislas Dehaene: «Non soltanto percepiamo in maniera cosciente solo una piccola quota dei segnali sensoriali che ci bombardano, ma, anche quando lo facciamo, ciò avviene con un ritardo di almeno un terzo di secondo [...] le

informazioni che attribuiamo al “presente” conscio sono datate, poiché risalgono ad almeno un terzo di secondo prima. La durata di tale periodo cieco può persino superare il mezzo secondo allorché l’input è così debole da richiedere una lenta accumulazione di dati prima di poter varcare la soglia della percezione cosciente».¹¹

Dunque la lezione da trarre non è semplicemente che la coscienza fornisce una narrazione differita degli avvenimenti del mondo extracranico, ma che il differimento è variabile. Se qualcuno grida *fuoco*, questa parola impiega probabilmente un tempo relativamente breve per raggiungere la

coscienza, perché il cervello inconscio riesce a trovare con rapidità una narrazione pertinente da inviare a quest'ultima. Ma quando ode l'enunciato *il riso non è ancora maturo* o l'enunciato *il riso fa buon sangue*, il cervello inconscio presumibilmente attende di avere un'interpretazione univoca del vocabolo *riso* prima di creare un percetto cosciente.

Il cervello taglia, mette in pausa e incolla la bobina della realtà prima di fornire alla mente una narrazione idonea degli eventi che si svolgono nel mondo intorno a noi. Eppure, a meno di soffermarci a riflettere su ciò, l'impressione che le nostre esperienze coscienti corrispondano a una

telecronaca diretta della realtà non ci abbandona.

Il tempo e il libero arbitrio

Al pari della parola *tempo*, il *libero arbitrio* (in inglese: *free will*), cioè la libertà del volere, è uno di quei concetti che, come affermava sant'Agostino a proposito del tempo, sappiamo che cos'è solo se non proviamo a spiegarlo.

Se un albero di una foresta cade e nessuno lo sente cadere, è lecito dire che cadendo ha emesso un suono? Il problema sta nell'ambiguità della parola *suono*: se definiamo correttamente *suono* come la vibrazione delle molecole dell'aria, allora l'albero che cade emette un suono, ma se definiamo *suono* come la percezione cosciente, da parte di un essere umano, delle molecole

che vibrano nell'aria, la risposta è *no*.

Il libero arbitrio esiste? Anche questo enigma ruota intorno all'ambiguità della sua definizione.¹²

Una delle definizioni di *free will* dell'Oxford English Dictionary è la seguente: «La facoltà di un individuo di compiere scelte libere, non determinate dalla predestinazione divina, dalle leggi della causalità fisica, dal fato ecc.»¹³

Questo è forse ciò che la maggioranza intende per libero arbitrio, ma dal punto di vista scientifico la definizione è infelice, perché se con "causalità fisica" si intendono le leggi fisiche allora rimane solo la possibilità che il libero arbitrio sia il prodotto di qualche

sostanza o entità inesprimibile simile all'anima. Per usare le parole del neuroscienziato Read Montague: «Il libero arbitrio è parente stretto della nozione di anima, cioè dell'idea che "io", i miei pensieri e i miei sentimenti derivino da un'entità separata e distinta dai meccanismi fisici che costituiscono il mio corpo».¹⁴ Volendo vedere la cosa in positivo, se ci attenessimo a questa definizione saremmo effettivamente in grado di risolvere l'enigma: no, il libero arbitrio non esiste, dato che il concetto di anima è una creazione della mente umana, non la fonte della mente umana.

Definizioni meno restrittive di libero arbitrio suonano come *la capacità di*

scegliere fra diverse possibili linee d'azione, oppure la capacità di agire in assenza di suggerimenti o coercizione.

Ma si tratta di definizioni irrimediabilmente vaghe, che non stabiliscono se le scelte debbano essere coscienti oppure no e parrebbero lasciare aperta la possibilità che, tutte le volte che mi fa scacco matto, un computer programmato per giocare a scacchi stia esercitando il libero arbitrio. Le definizioni che equiparano il libero arbitrio all'impredicibilità sono di maggiore aiuto. Afferma ad esempio Stephen Hawking: «Il motivo per cui diciamo che gli esseri umani sono dotati di libero arbitrio è che non siamo in

grado di prevedere ciò che faranno». ¹⁵

Analogamente, per Roger Penrose, «la questione del libero arbitrio viene discussa in relazione al determinismo». ¹⁶ In altre parole, se le leggi fisiche stabiliscono che è possibile prevedere sulla base del passato lo stato di qualunque sistema, compreso il cervello umano, nell'istante t , allora il libero arbitrio non esiste. Come spiega il filosofo Michael Lockwood: «Il determinismo universale è perciò diffusamente ritenuto incompatibile con l'esistenza del libero arbitrio. Infatti il determinismo universale è la tesi secondo cui l'universo è soggetto a un insieme di leggi rigide che, in

congiunzione con lo stato dell'universo in ogni dato istante, prescrivono con esattezza quale sarà lo stato dell'universo in qualunque istante successivo. Se davvero l'universo è deterministico in questo senso, ne discende [...] che tutti gli esiti futuri, incluse ovviamente tutte le nostre scelte e azioni future, sono predeterminati». ¹⁷

Sotto questo aspetto la meccanica quantistica è una teoria spinosa perché, a differenza del resto della fisica, si occupa di probabilità anziché di certezze. Sappiamo che, a qualche livello, gli eventi quantistici influenzano lo stato del cervello: in fin dei conti, ogni fotone rilevato (oppure no) dalla

retina rispetta le regole probabilistiche della meccanica quantistica. Perciò è probabilmente impossibile, persino in linea teorica, prevedere il comportamento umano con una precisione del 100 per cento. Tuttavia la meccanica quantistica fornisce una versione probabilistica di determinismo: fissa un dominio di possibilità e le loro rispettive probabilità, lasciando pertanto, agli occhi di molti filosofi, poco spazio al libero arbitrio.

Ma per chi crede che viviamo in un universo-blocco $4D$ decidere se le leggi della fisica sono deterministiche oppure no è una questione abbastanza secondaria, dal momento che, per sua natura, l'universo-blocco non lascia

spazio al libero arbitrio. Se il passato, il presente e il futuro coesistono all'interno dell'universo-blocco, tutte le scelte da compiere sono infatti «già» state compiute.

Tutte le definizioni sopra discusse non prendono in esame un aspetto fondamentale della questione del libero arbitrio: la sensazione insopprimibile di avere il controllo delle nostre scelte. Siamo «liberi di scegliere»? Su ciò possiamo avere idee opposte; ma possiamo concordare sul fatto che certamente *abbiamo la sensazione* di esserlo.¹⁸ Forse allora dovremmo definire il libero arbitrio proprio così: come una sensazione. Come lo

psicologo Daniel Wegner ha scritto nei primi anni duemila, il libero arbitrio «non è che una sensazione provata da un individuo. Sta all'azione come l'esperienza del dolore sta ai cambiamenti corporei provocati dallo stimolo doloroso». ¹⁹ Definire il libero arbitrio come la sfumatura di coscienza associata ai processi neurali preposti all'attività decisionale non è un'idea nuova. Quasi trecento anni fa il filosofo David Hume affermava: «Con “volontà” intendo nient'altro che l'impressione interna che proviamo, e di cui siamo coscienti, quando diamo intenzionalmente origine a un nuovo movimento del nostro corpo o a una

nuova percezione della nostra mente». [20](#)

Anche Thomas Huxley sosteneva che «la sensazione che chiamiamo volizione non è la causa di un atto volontario, bensì il simbolo di quello stato del cervello che è la causa immediata di quell'atto. Siamo automi coscienti, dotati di libero arbitrio nel solo senso intelligibile di questo termine così abusato». [21](#)

Gli esseri umani sono prevedibili?

Se scegliamo di definire il libero arbitrio come la sensazione che interviene dopo che il cervello compie una decisione – ossia dopo che i processi neurali inconsci del cervello compiono una decisione –, dovrebbe essere possibile individuare una firma neurale di tale decisione prima che il soggetto diventi cosciente di essa. Numerose ricerche suggeriscono che ciò sia effettivamente possibile. Questo genere di esperimenti è realizzabile solo nell'ambito di una delle tecniche normalmente usate per trattare le forme gravi di epilessia. I pazienti che soffrono di attacchi epilettici poco o per

nulla controllabili dai farmaci vengono talora sottoposti a una procedura chirurgica volta a rimuovere la parte del cervello responsabile dell'innescò degli attacchi. Per localizzare con precisione il focus epilettico, i neurochirurghi impiantano degli elettrodi nel cervello e aspettano che il paziente sia colto da un attacco. Registrando l'attività neurale durante l'attacco sono infatti in grado di individuare con esattezza l'area patologica da rimuovere chirurgicamente. Mentre gli elettrodi sono impiantati nel loro cervello e i medici attendono l'arrivo dell'attacco epilettico, in nome della scienza i pazienti spesso accettano di partecipare a uno o più esperimenti. In uno di questi,

condotto dal neuroscienziato dell'UCLA Itzhak Fried, furono impiantati degli elettrodi in un'area del lobo frontale detta *area motoria supplementare*. Ai pazienti fu chiesto di svolgere un compito semplicissimo: esercitare il loro «libero arbitrio» premendo un tasto del computer ogniqualvolta lo volevano. Ben prima che il tasto fosse premuto molti neuroni cambiavano il loro livello di attività. Esaminando l'attività di una popolazione di neuroni, di fatto risultò possibile prevedere con una precisione dell'80 per cento – 900 ms prima che il tasto fosse premuto (e 700 ms prima che i pazienti riferissero di essere consapevoli di aver deciso di compiere

il movimento in questione) – se un paziente stava per muovere il dito.²² Si noti che 900 ms è un tempo molto maggiore di quello di cui ha bisogno il cervello per eseguire un movimento del dito; per esempio, se vi chiedessero di premere un tasto del computer non appena vedete un lampo di luce, l'intervallo fra il lampo e la pressione del tasto sarebbe di circa 300 ms. Sorprendentemente, queste ricerche suggeriscono dunque che gli sperimentatori fossero in grado di prevedere che il soggetto stava per premere il tasto prima che il soggetto stesso fosse consapevole di accingersi a premerlo.

Una serie di studi correlati ha confermato che, almeno date certe circostanze, è possibile capire quali azioni gli esseri umani e gli animali compiranno centinaia di millisecondi, o persino interi secondi, prima che esse abbiano luogo.²³ Ma questi risultati non vogliono necessariamente dire che sia possibile prevedere con precisione il comportamento umano esaminando gli schemi di attività neurale, o che la coscienza non contribuisca alle nostre decisioni. Le decisioni studiate in questi esperimenti sono estremamente semplici. Decidere quando muovere un dito non è paragonabile a decidere se accettare un'offerta di lavoro. Perciò,

sebbene possa essere vero che scegliere quando flettere un dito è determinato da processi inconsci che attivano la sensazione cosciente del libero arbitrio, la decisione stessa di partecipare all'esperimento assunta dai pazienti dipende probabilmente da una miscela di processi neurali sia inconsci che coscienti.

Come si svolge il processo che porta alla pressione del tasto? Premere volontariamente un tasto richiede la contrazione dei muscoli del dito, la quale richiede una scarica di potenziali d'azione che viaggiano lungo il nervo mediano, la quale richiede l'attivazione dei neuroni motori al livello cervicale del midollo spinale, i quali sono a loro

volta innescati dall'attività dell'area della corteccia motoria associata alla mano. Ma che cosa fa sì che questi neuroni della corteccia motoria si attivino? Be', qui la faccenda si fa molto ingarbugliata, ma il succo è che per attivare un neurone qualsiasi occorre un brusco aumento dell'attività dei neuroni che formano una sinapsi con esso (i suoi partner presinaptici). In termini approssimativi, questo aumento può essere dovuto all'attivazione di un gran numero di neuroni presinaptici in un arco temporale di alcuni millisecondi (in questo caso si parla di *sommazione spaziale*, un po' come riempire velocemente una vasca versandovi molti

secchi d'acqua contemporaneamente), oppure all'attivazione ripetuta di alcuni neuroni presinaptici in un arco temporale dell'ordine delle decine di millisecondi o più (si tratta della *sommazione temporale*, paragonabile all'uso di un solo rubinetto per riempire la vasca). In entrambi i casi possiamo considerare il processo come un'*accumulazione progressiva della pulsione o delle evidenze* tendenti a una determinata decisione: è possibile che decidiate di vedere un film perché in una certa occasione molti dei vostri amici vi hanno consigliato di farlo (sommazione spaziale), oppure perché un solo amico, molto insistente, vi ha consigliato di farlo in molte occasioni diverse

(sommazione temporale). Un altro fattoide pertinente a questa discussione è che i neuroni sono «rumorosi»: la loro attività fluttua spontaneamente, innalzandosi e abbassandosi senza un motivo apparente (tali fluttuazioni hanno ovviamente delle cause, ma qui ci limiteremo ad attribuirle a un rumore casuale di fondo). Possiamo immaginare la semplice scelta fra premere un tasto oppure no come una «gara» fra due gruppi di neuroni, diciamo fra i neuroni corticali che presiedono all'abbassamento del dito sul tasto del computer e i neuroni corticali che presiedono al suo sollevamento. Uno dei due gruppi potrebbe guadagnare un

vantaggio iniziale grazie a fluttuazioni casuali e, in ciascuna prova, la decisione «voluta» di premere il tasto oppure no potrebbe essere provocata da fluttuazioni inconsce e casuali che hanno luogo in specifici circuiti del cervello: una volta che un gruppo di neuroni vince la gara, si generano un movimento motorio e la sensazione cosciente del libero arbitrio. Una spiegazione del fatto che i neuroscienziati riescano a prevedere il movimento del dito di un paziente con un anticipo di centinaia di millisecondi è che sono in grado di individuare il gruppo di neuroni che parte in vantaggio.

È troppo presto per trarre conclusioni definitive dalle ricerche

neurofisiologiche sul libero arbitrio, ma, in un campo notoriamente carente di dati sperimentali, queste ricerche fungono da punto fermo per qualunque discussione sul tema. E, come ha sintetizzato il neuroscienziato Patrick Haggard, si registra un consenso crescente intorno alla tesi secondo cui, «sebbene possiamo avere la sensazione che le nostre azioni siano causate dalle nostre decisioni e dai nostri pensieri coscienti, tali sensazioni di fatto sono il riflesso dell'attività di una rete di zone cerebrali che controllano l'azione volontaria». [24](#)

Ciò che percepiamo a livello cosciente come libero arbitrio è presumibilmente preceduto da computazioni neurali

inconsce preposte all'attività decisionale. E, in verità, è difficile capire come potrebbe essere altrimenti. Tutto ciò che sappiamo del cervello è in accordo con l'idea che tutti gli stati mentali siano prodotti da schemi di attività neurale interni al cervello, e che ogni nuovo schema neurale sia prodotto dall'interazione fra lo stato neurale precedente (composto tanto dagli stati attivi quanto dagli stati nascosti illustrati nel [Capitolo 6](#)), lo stimolo esterno attuale e le fluttuazioni stocastiche che hanno luogo a livello termodinamico e quantistico.

L'idea che il libero arbitrio non sia null'altro che una sensazione che interviene dopo che circuiti

inaccessibili alla coscienza hanno preso una decisione può risultare inquietante. In effetti è stato affermato che, se le cose stessero così, la coscienza sarebbe inutile, sarebbe «il proverbiale passeggero che dà consigli di guida non richiesti, un osservatore inetto di azioni che sono perennemente al di fuori del suo controllo».²⁵ Ma se anche la coscienza, come pure la sensazione del libero arbitrio, è una creazione a posteriori della mente, da ciò non deriva che non svolga un ruolo nell'attività decisionale! Se andate a un appuntamento al buio e, durante la cena, la persona che avete appena conosciuto impugna improvvisamente la forchetta e

vi infilza la mano, il rapido ritrarsi della vostra mano è probabilmente troppo veloce per essere attribuibile alla coscienza, sicché è probabile che la vostra azione sia indipendente dalla vostra sensazione cosciente di dolore. Ma è probabile che la vostra sensazione cosciente di dolore influenzi decisioni successive, ad esempio la decisione se andare oppure no a un secondo appuntamento. In termini evolutivi le esperienze soggettive e il libero arbitrio potrebbero essere primariamente fenomeni orientati al futuro. Ad esempio, forse è la sensazione del libero arbitrio che determina la convinzione di avere il controllo del proprio destino e di conseguenza l'impulso a prendere in

mano la situazione e a compiere le azioni a lungo termine, rivolte al futuro, necessarie per la sopravvivenza.

Delitto e castigo

Il dibattito sul libero arbitrio è cruciale per le questioni che attengono alla responsabilità morale e al sistema giudiziario. [26](#) Alcuni sostengono che, se le nostre decisioni scaturiscono da processi deterministici e inconsci che si svolgono nei nostri circuiti neurali, allora non siamo responsabili delle nostre azioni; in altre parole, che il determinismo è incompatibile con la responsabilità morale. Il fisico George Ellis, un fautore della teoria dell'universo-blocco in evoluzione (in cui il passato è un blocco spaziotemporale 4D congelato, ma il futuro non esiste ancora), ritiene che

l'eternalismo impedisca l'espressione della responsabilità morale: «Se siamo delle semplici macchine che vivono un futuro predeterminato, allora Adolf Hitler non aveva altra scelta che fare quello che ha fatto [...]. Per me questa è una tesi insostenibile, che condurrà a grandi mali perché la gente si limiterà a stare a guardare mentre il male si realizza». [27](#) In accordo con le preoccupazioni di Ellis, i sondaggi suggeriscono che, quando alle persone viene detto che tutte le nostre decisioni sono una conseguenza di eventi deterministici e inconsci, la probabilità che esse considerino gli altri responsabili delle loro azioni si

riduce. [28](#)

Consideriamo tre casi nei quali un pedone viene ferito da un automobilista: 1) il conducente aveva elaborato con cura un piano per colpire il pedone; 2) il conducente ha perso il controllo dell'automobile mentre guardava i messaggi sul proprio telefono cellulare; 3) il conducente ha perso il controllo della vettura mentre era in preda al suo primo attacco di epilessia. [29](#) Poiché tutti e tre gli scenari sono in ultima analisi riconducibili agli oscuri processi che si svolgono all'interno del cervello dell'automobilista, alcuni potrebbero temere che, senza ciò che la maggioranza ritiene essere il libero

arbitrio, in tutti e tre i casi l'automobilista «non avesse altra scelta che fare ciò che ha fatto». Questa preoccupazione, tuttavia, è in parte un effetto della credenza atavica nell'anima, è cioè una forma di *criptodualismo*, basata sull'assunzione implicita che la mente sia indipendente dal cervello. Se decido di guardare i messaggi sul cellulare mentre sto guidando, che cosa importa se i principali eventi neurali che hanno provocato questa decisione erano consci o inconsci, prevedibili o no, predeterminati oppure no? La decisione è stata presa dal mio cervello, cioè da me: non c'è alcuna distinzione fra me e il mio cervello! Questo non vuole affatto

dire che i tre scenari sopra delineati siano equivalenti, o che lo stato mentale del conducente non sia importante ai fini della determinazione della pena. Ma non dobbiamo confondere la questione della pena con quella della responsabilità. In tutti e tre gli scenari il conducente è responsabile, a prescindere dalla modalità – conscia o inconscia – con cui le decisioni sono state prese. In effetti ciò trova corrispondenza nell'attuale sistema giudiziario americano: l'automobilista sarà infatti ritenuto responsabile in tutti e tre i casi (ad esempio, sarà tenuto a pagare le spese mediche del pedone). Ciononostante, la pena giustamente varierà, perché si deve

prendere in considerazione un complesso insieme di fattori, fra cui l'eventuale premeditazione (cioè l'intenzione, non importa se derivante da un processo inconscio oppure conscio, di compiere un danno) e la probabilità di recidiva e di riabilitazione.

I neuroscienziati, i fisici, i filosofi e i giuristi continueranno a dibattere le questioni che concernono la responsabilità morale, il determinismo e il ruolo dei processi consci e inconsci nell'attività decisionale. Ma forse è tempo di usare il nostro «libero arbitrio» per accogliere la tesi che il libero arbitrio è la sensazione cosciente associata ai processi neurali che stanno alla base delle nostre decisioni,

decisioni di cui siamo pienamente responsabili perché ognuno di noi è la somma del proprio sé inconscio e del proprio sé cosciente.

Ci sono poche esperienze più persuasive del sentire ciascun fugace *adesso* che si dilegua nel passato mentre apre la porta a una gamma infinita di futuri possibili. È la cogenza di questa esperienza che ci fa apparire l'eternalismo come un attacco alla nostra comprensione della realtà. Eppure, per quanto controintuitiva possa essere, l'ipotesi che il passato e il futuro siano reali quanto il presente è l'ipotesi oggi prevalente. Ma questa teoria dell'universo-blocco non è esente da

debolezze. Non vi è infatti consenso unanime su quale sia la natura del tempo, poiché è ammissione diffusa che nelle leggi fisiche il tempo svolge ruoli differenti. In fisica, per esempio, si sta tentando di risolvere il cosiddetto *problema del tempo*: il conflitto fra il ruolo del tempo nella relatività generale e il ruolo del tempo nella meccanica quantistica. Nell'ambito della relatività generale il tempo (in quanto elemento costitutivo dello spaziotempo) può essere concepito come una componente della struttura dell'universo, mentre nella meccanica dei quanti è un parametro che governa l'evoluzione di un sistema quantistico. Ma la cosa sconcertante è che alcuni tentativi

matematici di unificare la relatività generale e la meccanica quantistica finiscono per privare il tempo di qualunque funzione. Il parametro del tempo scompare pari pari dalle equazioni,³⁰ lasciandoci l'impressione di vivere in un universo-blocco composto soltanto di tre dimensioni spaziali.

Le sfide all'eternalismo e all'universo-blocco non provengono solo dall'interno della fisica, ma anche dalle neuroscienze. In particolare, la teoria dell'universo-blocco non riesce a spiegare perché percepiamo il tempo scorrere, il che ha indotto alcuni studiosi a ipotizzare che l'esperienza soggettiva

del passaggio del tempo sia un artefatto mentale. Una delle nostre esperienze più rilevanti e universali potrebbe essere un'illusione nel senso più radicale del termine? Una famosa frase del genetista Theodosius Dobzhansky recita: «Nulla ha senso in biologia se non alla luce dell'evoluzione». Se dobbiamo prendere per vera questa affermazione, allora è logico ritenere che sia stata la pressione evolutiva a stabilire ciò di cui dobbiamo essere o non essere coscienti.³¹ È presumibile perciò che alcune funzioni svolte dal cervello generino delle esperienze soggettive a causa del fatto che la coscienza procura loro un vantaggio selettivo. Siamo coscienti

degli stimoli dolorosi perché l'esperienza soggettiva del dolore evidentemente offre un vantaggio selettivo che reazioni alle lesioni simili a quelle di uno zombie non forniscono (forse il vantaggio consiste nella protezione dalle possibili lesioni future). Stando a questo ragionamento, anche la sensazione dello scorrere del tempo dovrebbe procurare un vantaggio evolutivo. Ma, se viviamo nell'universo-blocco congelato dell'eternalismo, quale potrebbe essere questo vantaggio?

Un ulteriore conflitto fra la fisica e le neuroscienze discende dal fatto che, se il flusso del tempo è un'illusione creata dalla mente, allora le fette istantanee

dell'universo-blocco devono essere capaci di sostenere il fenomeno della coscienza. Tuttavia noi non siamo coscienti di momenti istantanei, bensì di spezzoni di tempo che colgono eventi interpretabili e ricchi di significato: il «presente specioso». Ancora più spinoso è il problema di capire se di per sé il fenomeno della coscienza richieda uno spessore temporale. Forse la coscienza è più simile all'evoluzione, ossia è un processo intrinsecamente temporale di cui non è davvero possibile affermare che sussiste dentro un fotogramma statico.

Mentre i fisici e i filosofi continuano a misurarsi coi problemi che il tempo

pone alla fisica, le ricerche neuroscientifiche sulla nostra percezione del flusso temporale dovrebbero entrare a far parte del dibattito. Occorre capire se la nostra sensazione soggettiva dello scorrere del tempo riflette un fenomeno fisico che va spiegato dalla fisica, oppure è una di quelle rare esperienze soggettive non correlate in alcun modo alla realtà. Per parte loro i neuroscienziati e gli psicologi devono comprendere che il cervello è nella sua essenza un organo temporale. Se dovessimo incautamente provare a sintetizzare in tre parole la funzione del cervello, queste parole potrebbero essere: *prevedere il futuro*. Il cervello misura il tempo, genera schemi

temporali, ricorda il passato e ci dona la capacità di proiettarci mentalmente nel futuro, tutto allo scopo di prevedere il futuro e prepararsi a esso.

Poiché il tempo è cruciale per il funzionamento del cervello, la sua misurazione è incorporata nel sistema operativo neurale ai livelli più profondi: sinapsi, neuroni e circuiti. Non ha senso chiedersi quale parte del cervello misuri il tempo, perché la maggior parte dei circuiti cerebrali, in una forma o nell'altra, svolge questo compito. Il principio dell'orologio multiplo ci dice che, a differenza di un orologio da polso capace di misurare dai millisecondi fino agli anni, il cervello possiede una

gamma di meccanismi distinti per misurare le varie scale temporali, e che persino all'interno di un intervallo dato, a seconda del compito da affrontare, esistono differenti circuiti preposti alla misura del tempo. Perché gli orologi del cervello umano sono così radicalmente diversi da quelli progettati dal cervello umano? Il motivo dipende in parte dalla differenza fra gli elementi costitutivi degli orologi fatti dall'uomo e quelli degli orologi neurali. Gli orologi artificiali contano i cicli consecutivi di un oscillatore: più la frequenza dell'oscillatore è alta, maggiore è il numero di cicli da contare. Gli elementi costitutivi del cervello difettano della precisione e dell'estensione numerica

dei componenti digitali degli orologi moderni: i neuroni non sanno contare fino a 32 768, meno che mai fino a 9 192 631 770.

Misurare il tempo è un'abilità che condividiamo con tutti gli altri animali, ma ciò che rende unico l'*Homo sapiens* è la capacità di trascendere i capricci della natura scrutando il futuro e plasmandolo per adattarlo alle proprie necessità. Tuttavia il viaggio mentale nel tempo è sia un dono che una maledizione. Scrutando l'avvenire i nostri antenati evidentemente prevederono più di ciò che erano preparati ad affrontare: la propria morte ineluttabile. Questa visione inquietante li spinse

ancora oltre nel futuro, inducendoli a inventare l'estremo viaggio mentale nel tempo: immaginarono un aldilà.

Viaggiare mentalmente nel tempo richiede un delicato equilibrio di scienza e arte, richiede cioè la capacità di estrapolare con rigore informazioni dal passato mediante la memoria e quella di immaginare l'inimmaginato. Questo equilibrio può spezzarsi. Talvolta passiamo troppo tempo a sognare, trascurando di occuparci di scenari che saremmo perfettamente in grado di prevedere e prevenire. Oggi abbiamo difficoltà a riconoscere e ad affrontare le questioni economiche, sanitarie e ambientali di lungo periodo che interpellano la nostra specie. Questa

miopia temporale è comprensibile: dal punto di vista evolutivo il viaggio mentale nel tempo è una facoltà di recente acquisizione. Fortunatamente, al pari di altre facoltà cognitive, essa trae immenso beneficio dall'esercizio e dall'apprendimento.

Forse viviamo in un universo nel quale solo l'*adesso* è reale, o forse l'*adesso* è arbitrario quanto il *qui*. O magari la natura del tempo è ancora più bizzarra e inesplicabile di come finora l'abbiamo variamente immaginata. Ma, quale che sia tale natura, non c'è alcuna scusa per smettere di affinare la nostra capacità di viaggiare mentalmente nel tempo, di imparare a meglio discernere

l'improbabile dall'impossibile, di preferire ricompense a lungo termine alle gratificazioni immediate, e di agire nell'*adesso* creando un futuro che vorremo abitare quando infine «diventerà» il presente.

Ringraziamenti

Il tempo meccanico è il livellatore di ultima istanza. A ciascuno di noi vengono concessi 86 400 secondi al giorno. Sono innumerevoli i libri scritti per aiutarci a utilizzare al meglio questa dotazione quotidiana di secondi. Lo psicologo Philip Zimbardo suggerisce di considerare le nostre quote di tempo, particolarmente quelle del cosiddetto tempo libero, come pacchetti da confezionare e donare alle persone e alle attività che più apprezziamo. Sono grato ai molti amici e colleghi che mi hanno fatto dono del loro tempo, perché

senza di loro questo libro non sarebbe stato possibile.

Il libro è il frutto di un interesse di lunga data nei confronti del modo in cui il cervello misura il tempo, un argomento a cui ho dedicato buona parte della mia carriera scientifica. Nel corso del mio viaggio ho tratto immenso beneficio dal lavoro e dall'incoraggiamento di alcuni scienziati che svolgono un ruolo guida nel campo degli studi sul tempo; in particolare, sono molto grato a Richard Ivry, Michael Mauk e Warren Meck per il loro sostegno. La mia riconoscenza va inoltre agli altri miei amici in questo settore, per il loro insegnamento e

discernimento: Domenica Bueti, Catalin Buhusi, Jenny Coull, Mehrdad Jazayeri, Hugo Merchant, Matt Matell, Kia Nobre, Virginie van Wassenhove e Beverly Wright.

Fra le gratificazioni derivanti dalla scrittura di un libro vi è il piacere di esplorare campi che sono al di fuori della propria ristretta e confortevole nicchia di studi. Nello scrivere quest'opera ho deciso di fare una sortita nella fisica del tempo, e sono perciò in debito con un certo numero di fisici e di filosofi i quali hanno pazientemente risposto alle mie ingenuie domande sul tempo, sulla relatività e sulla meccanica quantistica: fra questi, Richard Arthur, Vincent Buonomano, Sean Carroll, Craig

Callender, Per Kraus, Dennis Lehmkuhl, Terry Sejnowski, Lee Smolin e soprattutto Harvey Brown.

Nel tentativo di esporre in modo accessibile un vasto panorama di studi, ho senza dubbio commesso il peccato che consiste nell'omettere o semplificare eccessivamente, in nome della brevità, il contributo di molti colleghi e scienziati. Ma, alla fine, è più probabile che queste manchevolezze siano un sintomo dei miei personali limiti di scienziato e di scrittore. Mi scuso dunque in anticipo con quegli scienziati il cui lavoro ho ommesso di discutere o non ho citato nei modi dovuti.

Molti amici, colleghi e collaboratori hanno letto singoli capitoli del manoscritto o mi hanno erudito su alcuni degli argomenti affrontati nel libro. In particolare desidero ringraziare Judy Buonomano, David Burr, Chris Colwell, Jack Feldman, Paul Frankland, Dan Goldreich, Jason Goldsmith, Vishwa Goudar, Sam Harris, Nicholas Hardy, Sheena Josselyn, Rodrigo Laje, Michael Long, Hakwan Lau, Helen Motanis, Joe Pieroni, Carlos Portera-Cailliau, Rafael Núñez e Alcino Silva.

Le ricerche da me svolte sul modo in cui il cervello misura il tempo non sarebbero state possibili senza il sostegno del National Institute of Mental

Health e della National Science Foundation, nonché del Dipartimento di Neurobiologia e Psicologia dell'UCLA. Sono grato ad Annaka Harris e al mio redattore presso la Norton, Tom Mayer, per la loro assistenza e perizia editoriale. Infine, desidero ringraziare mia moglie, Ana, per avermi donato una porzione così grande del suo tempo.

Note

1:00 Gusti di tempo

1

<http://oxforddictionaries.com/words/the-oec-facts-about-the-language>.

2 Agostino 1986, p. 196.

3 Più precisamente, vediamo gli oggetti distribuiti nello spazio.

4 La retina di alcune specie è effettivamente dotata di cellule che colgono il movimento, ossia che si accorgono se un oggetto si «muove» nel tempo (e nello spazio). Inoltre va messo in evidenza che, in un certo senso, la

coclea misura effettivamente il tempo, perché le sue cellule sensoriali (le cellule ciliate interne) sono sintonizzate sulle frequenze di vibrazione delle molecole d'aria, e la frequenza è una misura indiretta della durata di un'oscillazione completa. Tali frequenze sono tuttavia così elevate da superare di gran lunga la soglia massima di sensibilità della maggior parte dei neuroni, e da rendere impossibile la percezione cosciente di questi intervalli.

5 Citato dall'Oxford English Dictionary.

6 Per un'analisi dettagliata della storia del pendolo cfr. Matthews 2000.

7 Diversi libri di divulgazione

offrono un'eccellente sguardo d'insieme sugli sviluppi storici della matematica e della fisica: cfr. ad esempio Penrose 1989.

8 Barbour 1999.

9 Wells 1860.

10 Sto semplificando, perché in realtà, intorno alla metà del xx secolo, furono pubblicati alcuni libri e articoli molto influenti e che in una certa misura hanno retto alla prova del tempo, ad esempio Lashley 1951 e Fraisse 1963.

11 Kandel *et al.* 2013. Il mio intento non è quello di suggerire che il libro in questione contenga un'omissione, bensì di fornire un esempio rappresentativo della limitata considerazione che le

neuroscienze in generale riservano al problema del tempo.

12 Ivry e Schlerf 2008.

13 Dudai e Carruthers 2005, Tulving 2005, Schacter e Addis 2007, Schacter *et al.* 2007.

14 La maggior parte dei filosofi e dei fisici concorderebbe nel ritenere che costruire una macchina del tempo fornirebbe un argomento forte contro il presentismo. La mia tesi qui è, in sostanza, che il viaggio nel tempo (più specificamente, le curve spaziotemporali chiuse di tipo tempo) sia incompatibile con il concetto di presentismo così come l'ho illustrato. Ma esistono casi ambigui. Ad esempio

si potrebbe sostenere che il tempo circolare, nel quale il presente si riavvolge su se stesso, sia compatibile tanto con il presentismo quanto con una forma di viaggio nel passato (di solito non è questo ciò che intendiamo per viaggio nel tempo). Ma, in generale, come affermato dal filosofo Michael Lockwood, «il viaggio nel tempo e la visione del tempo tensionale (*tensed*) ispirata al senso comune [...] non sono conciliabili. La stessa nozione di viaggio nel tempo ha senso solo nell'ambito di una visione atensionale (*tenseless*) del tempo» (Lockwood 2005). Si noti che Lockwood utilizza le espressioni *tempo tensionale* e *tempo atensionale* con lo stesso significato che

assegno qui, rispettivamente, a *presentismo* ed *eternalismo* [Sui termini *tensed* e *tenseless* cfr. [Cap. 8](#) e [nota 4](#) di tale capitolo, *N.d.T.*].

[15](#) Citato in Davies 1995, p. 253. Cfr. anche Smart 1964.

[16](#) Weyl (1949) 2009.

[17](#) Einstein 1905 [trad. it. p. 150].

2:00 *La migliore macchina del tempo che mai vi capiterà di avere*

1 Nell'omonimo racconto, pubblicato nel 1819 dallo scrittore americano Washington Irving, Rip Van Winkle cade addormentato dopo aver bevuto un liquore offertogli da un gruppo di misteriosi abitanti delle montagne. Risvegliatosi e tornato al proprio villaggio, scopre che sono trascorsi vent'anni, durante i quali ha avuto luogo la Rivoluzione americana [N.d.T.].

2 A quanto pare esistono alcuni antecedenti della *Macchina del tempo*, fra i quali il romanzo *El Anacronópete* dello scrittore spagnolo Enrique Gaspard. Devo sottolineare che le mie

cognizioni letterarie sono molto limitate, e che sicuramente non ho condotto un'indagine esauriente sul viaggio nel tempo nella storia della letteratura. È dunque probabile che vi sia qualche eccezione alla mia affermazione che il viaggio nel tempo propriamente detto ha fatto la sua comparsa soltanto alla fine del XIX secolo.

3 Anche se il passato e il futuro sono reali quanto il presente, e se il viaggio nel tempo non è espressamente impedito dalle leggi della fisica, queste ultime potrebbero senz'altro concorrere a renderlo impossibile in pratica – un concetto che Stephen Hawking ha chiamato «congettura della protezione

cronologica». Sulle possibilità del viaggio nel tempo e sulla fisica che ne definisce i termini sono stati scritti ottimi articoli e libri divulgativi, fra cui: Davies 1995, Thorne 1995, Carroll 2010 e Davies 2012.

⁴ Dennett 1991, p. 177, Clark 2013.

⁵ Henderson *et al.* 2006.

⁶ Tulving 2005.

⁷ Hume (1739) 2000, p. 116.

⁸ Földiák 1991, Wiskott e Sejnowski 2002, DiCarlo e Cox 2007.

⁹ Nell'ambito del condizionamento classico esiste un'eccezione. Gli esseri umani e altri animali sviluppano infatti un'avversione condizionata verso il gusto dei cibi che procurano loro

malessere, anche quando la distanza temporale fra l'assunzione del cibo e l'insorgenza del malessere è di molte ore (Buonomano 2011).

[10](#) Pinker 2014.

[11](#) Fraps 2014.

[12](#) In effetti esiste anche un'asimmetria che va a vantaggio del giocatore: infatti, se totalizzo esattamente 21, vinco immediatamente, anche nel caso in cui il mazziere dovesse a sua volta totalizzare 21. Ma, naturalmente, la probabilità che la somma delle carte sia precisamente 21 è inferiore alla probabilità che la loro somma superi questa cifra. Ho narrato questo episodio anche in Buonomano

2011.

13 Beaulieu *et al.* 1992, Shepherd 1998, Herculano-Houzel 2009.

14 Qui sto un po' semplificando. Esistono nel cervello connessioni e forze sinaptiche direttamente governate dai nostri geni, ma è probabile che nella corteccia la forza di gran parte delle sinapsi sia determinata dall'interazione fra le regole di apprendimento sinaptico e l'esperienza.

15 In inglese la lettera *o* e il dittongo *oe* in *Zoe* si pronunciano entrambi /ə/ [N.d.T.].

16 I primi studi sulla plasticità dipendente dalla temporizzazione dei potenziali d'azione furono pubblicati da

Debanne *et al.* 1994, Markram *et al.* 1997, Bi e Poo 1998, ma una ricerca svolta negli anni ottanta aveva già individuato principi simili (Levy e Steward 1983). In pratica esistono molte versioni differenti della regola STDP. Ma, in genere, per ogni dato intervallo il grado di potenziamento o di depressione può variare drasticamente, e di solito vi è un'asimmetria, nel senso che per lo stesso intervallo assoluto il grado di potenziamento è diverso dal grado di depressione (Abbott e Nelson 2000, Karmarkar *et al.* 2002).

3:00 *Giorno e notte*

1 Meijer e Robbers 2014.

2 Pierce *et al.* 1986.

3 Routtenberg e Kuznesof 1967, Morrow *et al.* 1997, Gutierrez 2013.

4 Vitaterna *et al.* 1994.

5 Welsh *et al.* 1986, Herzog *et al.* 2004.

6 James 1890. Per ricerche di laboratorio su questo tema cfr. Moorcroft *et al.* 1997; Born *et al.* 1999; Ikeda *et al.* 2014.

7

<http://www.nytimes.com/1989/05/17/us/researcher-loses-track-of-time-in-cave.html>; *She Spent 111 Days Alone in*

a Cave, in «San Francisco Chronicle», 1 dicembre 1988;

<http://www.telegraph.co.uk/news/obituar/obituaries/6216073/Maurizio-Montalbini.html>.

⁸ Aschoff 1985. Cfr. anche Czeisler *et al.* 1980, Lavie 2001.

⁹ Ralph *et al.* 1990, Weaver 1998.

¹⁰ Johnson *et al.* 1998, Ouyang *et al.* 1998. Cfr. anche Summa e Turek 2015.

¹¹ Nikaido e Johnson 2000, Sharma 2003, Rosbash 2009. Un elemento a favore di questa ipotesi consiste nel fatto che il *criptocromo*, uno dei sensori di luce circadiani riscontrabili negli insetti, presenta un elevato grado di omologia con un enzima che ripara i

danni del DNA causati dai raggi ultravioletti.

[12](#) Konopka e Benzer 1971. Per un'eccellente esposizione divulgativa delle ricerche riguardanti l'orologio circadiano cfr. Reddy *et al.* 1984, Weiner 1999.

[13](#) Reddy *et al.* 1984. Il gene fu contemporaneamente individuato anche da un altro gruppo di ricercatori (Bargiello *et al.* 1984).

[14](#) Smolen *et al.* 2004, suggeriscono che la compensazione termica derivi da variazioni bilanciate dipendenti dalla temperatura nelle reazioni chimiche; è inoltre possibile che specifici amminoacidi presenti nelle proteine

determinino una compensazione termica modificando le loro proprietà di legame in funzione della temperatura (Hissain *et al.* 2014).

[15](#) Mentre nella *Drosophila* esiste un solo tipo di gene *Period*, nei mammiferi ve ne sono tre varianti.

[16](#) Colwell 2011.

[17](#) Davidson *et al.* 2006.

[18](#) Jones *et al.* 1999, Toh *et al.* 2001, Jones *et al.* 2013.

[19](#) Knutsson 2003, Kivimäki *et al.* 2011.

[20](#) Summa e Turek 2015.

[21](#) Sharma 2003.

[22](#) Aschoff 1985.

23 Sono molte le prove a sostegno dell'ipotesi che la misurazione del tempo su scala circadiana e la misurazione del tempo sulla scala dei secondi siano indipendenti: le mutazioni dei geni dell'orologio circadiano non incidono specificamente sulla misurazione degli intervalli (Cordes e Gallistel 2008, Papachristos *et al.* 2011); le osservazioni sugli esseri umani suggeriscono che periodi di isolamento circadiano prolungati (che alterano i giudizi di 1 ora) non influiscano sulle prestazioni relative a compiti di misurazione dei secondi (Aschoff 1985); e le lesioni del nucleo soprachiasmatico che alterano

gravemente il ritmo circadiano non modificano la misurazione del tempo nel caso della procedura del picco (Lewis *et al.* 2003) [cfr. più avanti, cap. 4, nota 18]. Alcuni dati suggeriscono che il gene *Period* incida sulla capacità dei moscerini di dare il ritmo appropriato al loro canto di corteggiamento (Kyriacou e Hall 1980), ma si tratta di risultati controversi (Ster 2014) e in disaccordo con le nostre conoscenze circa il funzionamento dell'orologio circadiano. Benché improbabile, è possibile che i geni dell'orologio circadiano contribuiscano direttamente ad altri aspetti della funzione neurale rilevanti per la misurazione del tempo su scale più brevi. Cfr. anche Golombek *et al.*

2014.

[24](#) Foster e Wulff 2005, Loh *et al.*

2010.

[25](#) Foster e Roenneberg 2008.

Sebbene un'abbondanza di risultati indichi che la fase lunare non regola la fisiologia umana, vi sono alcune eccezioni. Uno studio suggerisce ad esempio che la fase lunare governi alcuni aspetti della fisiologia del sonno, come la quantità di tempo necessaria ad addormentarsi (Cajochen *et al.* 2013).

[26](#) Hoskins 1993.

[27](#) Tessmar-Raible *et al.* 2011;

Zantke *et al.* 2013.

4:00 *Il sesto senso*

1

<https://www.worldsciencefestival.com/v/deceptive-watchman-how-our-brains-twist-time/>.

2 Heim 1892, p. 329; cfr. anche Noyes e Kletti 1972.

3 Loftus *et al.* 1987, Buckhout *et al.* 1989, Campbell e Bryant 2007, Stetson *et al.* 2007, Buckley 2014.

4 Matthews e Meck 2016.

5 Hammond 2012.

6 James 1890, p. 624.

7 L'idea che il numero di fatti nella memoria determini i giudizi temporali retrospettivi va sotto il nome di ipotesi

delle «dimensioni di immagazzinamento» (*storage size*) (Ornstein 1969); un'ipotesi correlata è che a incrementare le stime retrospettive sia il grado di «cambiamento contestuale» che si verifica in un dato periodo di tempo (Zakay e Block 1997). Poiché è probabile che anche i cambiamenti contestuali – quali l'alterazione degli stimoli sensoriali, degli ambienti o dei compiti – accrescano la memorabilità degli eventi, le due ipotesi risultano fortemente complementari.

⁸ Hicks *et al.* 1976; Block *et al.* 2010.

⁹ Tom *et al.* 1997; Whiting e Donthu,

2009.

[10](#) Van Wassenhove 2009. Quella qui proposta è una descrizione semplificata degli esperimenti: di fatto gli stimoli campione erano proposti quattro volte prima che fosse presentato lo stimolo di confronto, o stimolo «deviante».

[11](#) Stimoli uditivi vs visivi: cfr. Wearden *et al.* 1998, Harrington *et al.* 2014. Novità e familiarità: cfr. Tse *et al.* 2004, Pariyadath e Eagleman 2007, Matthews 2015. Intensità, dimensioni e valore numerico: cfr. Oliveri *et al.* 2008, Chang *et al.* 2011; Cai e Wang 2014.

[12](#) Yarrow *et al.* 2001; Park *et al.* 2003; Morrone *et al.* 2005.

[13](#) James 1890.

[14](#) Sacks 2004. Sacks attribuisce questo aneddoto a L. J. West (*Psychomimetic Drugs*).

[15](#) Wearden *et al.* 2014; Wearden 2015.

[16](#) Wearden 2015.

[17](#) Tinklenberg *et al.* 1976.

[18](#) In pratica, la maggior parte degli studi sugli animali adotta una variante della procedura a intervallo fisso, detta procedura del picco, nella quale alcune prove non vengono rinforzate. La ricerca sui ratti è opera di Han e Robinson 2001. Per ulteriori ricerche, confermativa e non, cfr. McClure e

McMillan 1997, Lieving *et al.* 2006, Atakan *et al.* 2012, Sewell *et al.* 2013.

19 Meck 1996; Coull *et al.* 2011.

20 Rammsayer 1992, Rammsayer e Vogel 1992, Rammsayer 1999, Coull *et al.* 2011.

21 Loftus *et al.* 1987, Sacks 2004, Stetson *et al.* 2007, Arstila 2012.

22 Esiste un certo numero di modi mediante i quali ciò potrebbe realizzarsi, fra i quali: 1) la depolarizzazione dei neuroni nella misura di qualche millivolt, tale da avvicinarli al loro potenziale di soglia; 2) l'effettiva diminuzione della costante di tempo dei neuroni attraverso la chiusura dei canali potassio; 3)

l'aumento della quantità di neurotrasmettitore rilasciato dalle terminazioni presinaptiche; oppure 4) l'inibizione dei neuroni inibitori, che spesso attenuano e rallentano la risposta dei neuroni eccitatori. Si potrebbe inoltre sostenere che l'accelerazione dell'elaborazione neurale è realizzabile anche aumentando la temperatura locale del cervello mediante l'incremento del flusso sanguigno.

23 Martin e Garfield 2006; Terry *et al.* 2008, Swann *et al.* 2013. Un ulteriore problema posto dall'ipotesi dell'overclocking è che, anche nel caso in cui il cervello avesse a disposizione una modalità ad alta velocità, non è

affatto chiaro se quest'ultima potrebbe attivarsi con tempestività tale da essere utilizzabile in situazioni subitane di pericolo estremo. Affinché il cervello entri in questa ipotetica modalità di overclocking, i segnali sensoriali recanti l'informazione che le cose hanno appena preso una bruttissima piega devono giungere dagli organi di senso ed essere elaborati dal cervello prima che tutti gli allarmi siano azionati e nel cervello e nel sangue si diffondano i neuromodulatori di attacco-o-fuga come la norepinefrina e l'epinefrina (adrenalina). Solo per entrare pienamente in overclocking potrebbe essere necessario un secondo.

[24](#) Buckley 2014.

[25](#) Citato da Arstila 2012.

[26](#) Loftus 1996, Buonomano 2011.

[27](#) Cahill e McGaugh 1996, Schacter 1996.

[28](#) Non voglio qui minimizzare l'importanza delle ricerche sulla sindrome dell'arto mancante, una condizione clinica molto grave che può causare enormi sofferenze agli amputati.

[29](#) Arstila 2012.

[30](#) Wearden 2015.

[31](#) Noyes e Kletti 1976.

[32](#) *How many roads must a man walk down / Before you can call him a man?*
(«Quante strade deve percorrere un

uomo / Prima che lo si possa chiamare uomo?») Sono i primi due versi di *Blowin' in the Wind* di Bob Dylan [N.d.T.].

33 Il fenomeno della ripetizione è descritto in un gran numero di studi, fra i quali: Wilson e McNaughton 1994, Foster e Kokko 2009, Karlsson e Frank 2009.

5:00 *Schemi nel tempo*

1 Il linguaggio è altamente ridondante, il che significa che in genere esistono molti indizi diversi che permettono di disambiguare un'espressione. E nel discorso naturale la gestione dei tempi è solo uno di tali indizi, accanto al contesto e all'intonazione. Per studi che esaminano il ruolo dei segnali temporali nel discorso cfr. Lehiste 1960, Lehiste *et al.* 1976, Aasland e Baum 2003, Schwab *et al.* 2008.

2 Breitenstein *et al.* 2001a, Breitenstein *et al.* 2001b, Taler *et al.* 2008.

3 Una «battuta non» (*not joke*) è un genere di battuta introdotto dal comico canadese-americano Mike Myers nel film *Wayne's World* (titolo italiano: *Fusi di testa*) del 1992. Consiste nel fare un'affermazione per poi negarla alla sua conclusione pronunciando con enfasi la negazione *not* («non») [*N.d.T.*].

4 Brownell e Gardner 1988.

5 Aasland e Baum 2003.

6 Grieser e Kuhl 1988, Bryant e Barrett 2007, Broesch e Bryant 2015.

7 Bregman 1990.

8

<http://www.washingtonpost.com/national/a-denton-jr-vietnam-pow-and-us-senator-dies/2014/03/28/1a15343e->

b500-11e3-b899-20667de76985_story.html.

9

www.arrl.org/files/file/Technology/x900

8 luglio 15.

10 Wright *et al.* 1997. L'esperimento evidenziò inoltre che i soggetti miglioravano anche sotto un profilo «spaziale»: l'addestramento su un intervallo di 100 ms delimitato da due segnali sonori da 1 kHz migliorava infatti anche la capacità di discriminare un intervallo di 100 ms delimitato da segnali sonori da 4 kHz. E studi successivi hanno dimostrato che l'addestramento su un dato intervallo può persino migliorare la

discriminazione del medesimo intervallo presentato in una modalità differente: ad esempio, l'addestramento nella modalità somatosensoriale conduce a un miglioramento nella modalità uditiva (Nagarajan *et al.* 1998). Non ho discusso questi risultati nel dettaglio perché sembra che questa generalizzazione a diversi canali spaziali sia dissociabile dall'apprendimento. Specificamente, nella modalità uditiva la generalizzazione a intervalli differenti si verifica solo dopo l'apprendimento degli intervalli oggetto dell'addestramento (Wright *et al.* 2010).

11 Per una sintesi degli studi

indicanti che l'apprendimento della discriminazione degli intervalli è intervallo-specifico cfr. Bueti e Buonomano 2014.

12 Kele *et al.* 1985.

13 Lo studio sugli intervalli di 50 e 1000 ms è opera di Rammsayer *et al.* 2012. Lo studio sui percussionisti è stato condotto da Cicchini *et al.* 2012.

14 <https://www.youtube.com/watch?v=utkb1nOJnD4>, 14 luglio 2015.

15 Patel *et al.* 2009.

16 Zarco *et al.* 2009. Cfr. anche Honing *et al.* 2012.

17 Patel 2006, Patel *et al.* 2014.

18 Meyer 1961.

[19](#) Doupe e Kuhl 1999.

[20](#) Hahnloser *et al.* 2002; Long *et al.* 2010.

[21](#) Long e Fee 2008.

[22](#) Garcia e Mauk 1998, Mauk e Buonomano 2004, Shuler e Bear 2006, Livesey *et al.* 2007; Coull *et al.* 2011, Bueti *et al.* 2012, Kim *et al.* 2013, Merchant *et al.* 2013, Crowe *et al.* 2014, Eichenbaum 2014, Goel e Buonomano 2014, Mello *et al.* 2015.

[23](#) Wiener *et al.* 2010, Coull *et al.* 2011, Merchant *et al.* 2013, Coull *et al.* 2015.

[24](#) Johnson *et al.* 2010, Goel e Buonomano 2016.

[25](#) Per la precisione i fotorecettori dell'occhio non sono attivati dalla luce: sono invece spenti dalla luce, mentre quando sono al buio si trovano normalmente «accesi».

[26](#) Chubykin *et al.* 2013.

[27](#) Richards 1973.

6:00 Tempo, dinamica neurale e caos

[121](#) Einstein e Infeld (1938) 1966, p. 180 [trad. it. p. 189].

[122](#) Creelman 1962, Treisman 1963. Negli anni settanta e ottanta del xx secolo furono sviluppate versioni più sofisticate del modello dell'orologio interno, la più influente delle quali è detta *teoria dell'aspettativa scalare* (*scalar expectancy theory*, SET), la quale, oltre a un pacemaker-accumulatore che computa il tempo, prevede dei componenti che registrano e confrontano le durate temporali, nonché un meccanismo di gating il cui scopo è cogliere gli effetti dell'attenzione sulla misurazione del tempo (Gibbon 1977,

Gibbon *et al.* 1984).

[123](#) Feldman e Del Negro 2006.

[124](#) Miall 1989, Matell e Meck 2004, Buhusi e Meck 2005.

[125](#) Zucker 1989, Zucker e Regehr 2002.

[126](#) Buonomano e Merzenich 1995, Buonomano 2000. Cfr. anche Fortune e Rose 2001.

[127](#) Buonomano 2000.

[128](#) Carlson 2009, Rose *et al.* 2011, Kostarakos e Hedwig 2012. Per esempi di neuroni intervallo-selettivi (o, più precisamente, intervallo-sensibili) nei mammiferi cfr. Kilgard e Merzenich 2002, Bray *et al.* 2008, Sadagopan e Wang 2009, Zhou *et al.* 2010.

[129](#) Beaulieu *et al.* 1992.

[130](#) Buonomano e Merzenich 1995, Maass *et al.* 2002, Buonomano e Maass 2009.

[131](#) Kilgard e Merzenich 2002, Rennaker *et al.* 2007, Nikolić *et al.* 2009, Sadagopan e Wang 2009, Zhou *et al.* 2010, Klampfl *et al.* 2012.

[132](#) Haeusler e Maass 2007, Buonomano e Maass 2009, Lee e Buonomano 2012.

[133](#) Buonomano e Mauk 1994, Mauk e Donegan 1997, Medina *et al.* 2000.

[134](#) Perrett *et al.* 1993, Raymond *et al.* 1996, Ohyama *et al.* 2003.

[135](#) Mello *et al.* 2015.

136 Pastalkova *et al.* 2008, MacDonald *et al.* 2011, Kraus *et al.* 2013, Mac-Donald *et al.* 2013, Modi *et al.* 2014.

137 Lebedev *et al.* 2008, Jin *et al.* 2009, Crowe *et al.* 2010, Kim *et al.* 2013, Stokes *et al.* 2013, Crowe *et al.* 2014, Carnevale *et al.* 2015.

138 Sono molti i ricercatori che hanno rilevato crescite approssimativamente lineari del tasso di attivazione nel caso di compiti motori temporizzati, cioè compiti nei quali un animale fornisce una risposta dopo che uno stimolo è stato presentato per una quantità fissa di tempo (Quintana e Fuster 1992, Leon e Shadlen 2003, Mita

et al. 2009, Jazayeri e Shadlen 2015). Ma una ricerca condotta da Michael Shadlen ha suggerito che potrebbe essere più corretto concepire questi schemi di attività a rampa come la preparazione alla risposta motoria anziché come il cronometro vero e proprio (benché le due cose siano spesso strettamente collegate). Per esempio, l'inizio di una gara può essere preceduto da tre comandi: PRONTI, ATTENTI, VIA. Al momento dell'ATTENTI è possibile che i concorrenti comincino a elaborare delle previsioni circa il momento in cui scattare, mentre ciascun istante che passa aumenta la probabilità che venga dato il segnale del VIA. I neuroni a rampa potrebbero incorporare queste

previsioni dipendenti dal tempo, una cosa un po' diversa dalla misurazione del tempo vera e propria, perché se gli animali sono addestrati ad aspettarsi il segnale del VIA dopo 0,15 oppure dopo 1,8 secondi circa, l'attività cellulare a rampa aumenta o diminuisce in base alle previsioni e non in base al tempo assoluto (Janssen e Shadlen 2005).

139 Sompolinsky *et al.* 1988.

140 Mante *et al.* 2013, Rigotti *et al.* 2013, Sussillo e Barak 2013, Carnevale *et al.* 2015.

7:00 *Tenere il tempo*

1 Bhardwaj *et al.* 2006, Spalding *et al.* 2013. A dimostrare che la neurogenesi adulta può verificarsi negli esseri umani hanno contribuito in maniera rilevante anche ricerche condotte con metodi alternativi (Eriksson *et al.* 1998).

2 In questo caso il tempo di dimezzamento è dato dalla formula $t_{50} = \ln(2) \times 2^{10}$ unità di tempo.

3 Duncan 1999.

4 Matthews 2000, p. 53.

5 Il frammento è riportato ne *Le notti attiche* (libro III, 3, 5), opera scritta da Aulo Gellio nel II secolo dopo Cristo

(Gellio 1992, I, p. 347).

6 Mumford (1934) 2010, p. 4.

7 La versione originale della filastrocca è francese: *Frère Jacques, frère Jacques, / Dormez-vous? Dormez-vous? / Sonnez les matines! Sonnez les matines! / Ding, daing, dong. Ding, daing, dong.*

8 Matthews 2000.

9 *Ibid.*

10 Le deviazioni standard del periodo degli orologi circadiani dei roditori sono stimate fra i 5 e i 15 minuti (Welsh *et al.* 1986, Herzog *et al.* 2004).

11 Landes 1983, pp. 149-57.

12 Galison 2003.

13 Per esempio, l'orologio NIST-F2 del National Institute of Standards and Technology degli Stati Uniti perde un secondo ogni 300 milioni di anni. Gli orologi atomici di nuova generazione, a reticolo ottico, hanno tuttavia prestazioni di gran lunga superiori (Hinkley *et al.* 2013, Bloom *et al.* 2014).

14

<http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/second.html>, 10 febbraio 2015.

15 Ci si potrebbe domandare: se il ricevitore GPS deve riuscire a cogliere differenze di 30 nanosecondi non ha forse bisogno di avere un orologio atomico? In teoria sì, ma al ricevitore GPS è sufficiente essere dotato di un

normale orologio al quarzo perché utilizza i precisi segnali orari provenienti da un gran numero di satelliti per calibrare in continuazione il proprio orologio.

16 Levine 1996, p. 68.

17 Mumford (1934) 2010, p. 14.

18

<http://www.chicagotribune.com/news/ch/yellow-light-standard-change-20141010-story.html>, 17 febbraio 2015.

19 Lombardi 2002.

8:00 Il tempo: che diavolo è?

1 Discuto questo esempio e i temi a esso correlati nel mio libro precedente (Buonomano 2011).

2 Per una magnifica sintesi di molti dei diversi punti di vista sulla natura del tempo cfr. Callender e Edney 2010.

3 Smolin 2013.

4 I termini inglesi *tensed* e *untensed* derivano da *tense* («tempo verbale») e perciò in senso letterale significano rispettivamente «dotato di tempo verbale» e «privo di tempo verbale» [N.d.T.].

5 Ellis 2014.

6 Barbour 1999, p. 67.

7 Muller e Nobre 2014.

8 Callender 2010a.

9 Penrose 1989.

10 Nel caso dell'elettromagnetismo e in quello della meccanica quantistica, per ribaltare la direzione del cambiamento occorre invertire anche altri parametri.

11 Per un'eccellente presentazione dei misteri e delle teorie riguardanti l'origine dell'universo e la freccia del tempo cfr. Carroll 2010.

12 Fra coloro che sostengono che la misurazione quantistica impone una freccia del tempo vi è George Ellis (Ellis 2008). Per eccellenti disamine del

problema della misura, e della sua possibile reversibilità, nella meccanica quantistica cfr. Penrose 1989 e Greene 2004.

13 Questa è una descrizione molto abbreviata del famoso esperimento della doppia fenditura, il quale suggerisce che l'elettrone passi attraverso entrambe le fenditure. In particolare, anche quando un solo elettrone alla volta è sparato verso la barriera, sullo schermo di rilevazione si osserva una figura di interferenza. Ad esempio, quando una sola fenditura è aperta, ci sarà un punto P dello schermo che sarà colpito da una certa percentuale X degli elettroni. Se ora apriamo entrambe le fenditure,

logica vorrebbe che la stessa percentuale X , o una percentuale ancora maggiore, colpisca quel punto. Stranamente, invece, si genera una figura di interferenza, cioè nel punto P potrebbe essere rilevato un numero inferiore di elettroni. Perciò sembra che l'elettrone si stia comportando come un'onda che interferisce con se stessa, fino al momento della misurazione (ossia del collasso della funzione d'onda). Nondimeno, se si collocano dei rilevatori in entrambe le fenditure, l'elettrone viene rilevato nell'una oppure nell'altra. Esistono molti ottimi libri divulgativi che illustrano le strane caratteristiche del mondo dei quanti, fra i quali Rae 1986, Greene 2004, Carroll

2010.

14 Peggio ancora, l'equazione di Wheeler-DeWitt – derivata dalla fusione fra la meccanica quantistica e la relatività generale – si spinge ancora oltre, prospettando un universo nel quale il tempo non esiste affatto (Barbour 1999).

9:00 *La spazializzazione del tempo in fisica*

1 Einstein e Besso 1972 [trad. it. p. 707].

2 Quello descritto è un esperimento mentale, sicché è bene non soffermarsi sui dettagli: ad esempio, in relazione a ciò che stiamo definendo, la velocità dell'astronave, il fatto che la Terra a sua volta si muova e il fatto che le partite di pallacanestro si giochino in genere in palazzetti chiusi.

3 Più precisamente, per tutti gli osservatori che si muovono di moto uniforme rispetto a un sistema di riferimento inerziale.

4 A basse velocità questa addizione lineare è un'eccellente approssimazione della velocità reale calcolata tenendo conto della relatività ristretta, il cui valore è 399.999999999989 km/h.

5 Questa equazione presuppone che abbiamo sincronizzato i nostri orologi a $t = 0$ trovandoci nello stesso luogo; e che definiamo le nostre rispettive posizioni all'interno dei nostri sistemi di coordinate come $x^{\text{voi}} = x^{\text{io}} = 0$.

6 A questo punto potreste pensare: *Un momento: essendo la velocità fra di noi la stessa dall'una come dall'altra prospettiva, dato che io sono sul treno calcolerò a mia volta che un anno del tempo di chi si trova sulla banchina*

corrisponde a ventidue dei miei anni.

Questo problema sta alla base del cosiddetto paradosso dei gemelli. Confrontare degli orologi situati in punti diversi dello spazio è una strategia imprudente; è più produttivo confrontare gli orologi (o le età) dopo che gli osservatori si trovano nuovamente nello stesso punto dello spazio, cioè dopo che siete tornati sulla banchina. A questo punto, si constaterà che chi era sul treno è molto più giovane di chi è rimasto sulla banchina. Una causa di tale asimmetria è il fatto che, a differenza dello spettatore sulla banchina, chi ha viaggiato sul treno ha dovuto cambiare sistemi di riferimento. La conclusione è che l'intervallo spaziotemporale

percorso dalla persona sulla banchina è *maggiore* dell'intervallo spaziotemporale percorso da chi è sul treno, e questo intervallo spaziotemporale corrisponde al tempo meccanico (il cosiddetto tempo proprio). Per una discussione del paradosso dei gemelli cfr. Lockwood 2005, Lasky 2012.

7 Hafele e Keating 1972b, 1972a. Naturalmente la Terra non è un corpo statico: ad esempio, si muove rispetto al Sole. Ma ai nostri fini possiamo considerare il centro della Terra come un valido sistema fisso di riferimento. Dato però che la Terra ruota su se stessa, la velocità dell'aereo diretto a

est deve essere sommata alla velocità di rotazione della Terra, sicché gli orologi sugli aerei diretti a est vanno più veloce dei loro omologhi al suolo e di conseguenza il loro ritmo risulta rallentato. Hafele e Keating collocarono degli orologi anche su aerei diretti a ovest, e siccome tali aerei di fatto si oppongono alla velocità di rotazione della Terra, questi orologi manifestarono l'atteso incremento cinematico dovuto alla relatività ristretta. Poiché inoltre gli orologi situati sugli aerei erano sottoposti a campi gravitazionali più deboli, gli sperimentatori dovettero prendere in considerazione anche le previsioni della relatività generale, che risultarono

anch'esse confermate da questa ricerca.

8 Poiché la relatività ristretta afferma che ad alte velocità il tempo si dilata e lo spazio si contrae, dalla mia prospettiva la lunghezza del treno di fatto sarà maggiore. Ho semplificato l'esperimento mentale ignorando questo aspetto, ma la contrazione spaziale non altera il risultato, poiché dal mio punto di vista voi vi trovate comunque a metà del treno e i due proiettili partono da un punto equidistante dalla testa e dalla coda del treno.

9 In questo esempio ho collocato gli osservatori in modo che fossero equidistanti dalla testa e dalla coda del treno, nel tentativo di esprimere il fatto

che i ritardi di trasmissione dalla testa e dalla coda dovrebbero pareggiarsi. Ma possiamo immaginare di disporre lungo tutta la banchina una fila di cronometri sincronizzati che vengano fermati dalla rottura di un vetro vicino. Questi cronometri ci diranno che il parabrezza e il lunotto si sono rotti in momenti diversi.

[10](#) Per una discussione più approfondita, teorica e storica, della relatività della simultaneità cfr. Brown 2005.

[11](#) Rietdijk 1966, Putnam 1967.

[12](#) È importante notare che la perdita della simultaneità assoluta è certamente un argomento che avvantaggia la tesi

dell'universo-blocco, ma nulla di più. Si potrebbe infatti sostenere che la vera lezione da trarre dalla relatività ristretta non è che viviamo in un universo-blocco, bensì che il concetto di simultaneità è un residuo della nozione newtoniana di tempo assoluto. Forse non ha davvero senso domandarsi se due eventi distanti nello spazio siano simultanei: dopo tutto, l'unico modo per stabilire se sono simultanei oppure no è quello di utilizzare degli orologi, e gli orologi sono semplicemente congegni che misurano il mutamento in un volume locale di spazio.

13 Anche Karl Popper rievoca una discussione in cui Einstein confermò di

accettare la tesi dell'universo-blocco (Popper 1992), e riferisce che nel corso di essa si era rivolto ad Einstein chiamandolo Parmenide.

[14](#) Carnap 1963, p. 37 [trad. it. p. 38].

[15](#) Penrose 1989, p. 394.

[16](#) Davies 1995, p. 283 [trad. it. p. 316].

[17](#) Barbour 1999, p. 267 [trad. it. pp. 266-67].

[18](#) Greene 2004 [trad. it. p. 166].

[19](#) Schuster *et al.* 2004.

[20](#) Panagiotaropoulos *et al.* 2012, Kandel *et al.* 2013, Purdon *et al.* 2013, Baker *et al.* 2014, Ishizawa *et al.* 2016.

21 Molti processi fisici – comprese la vita, la temperatura o la velocità di una particella – si definiscono in base al modo in cui un sistema muta nel tempo. Ma è importante comprendere che nessuno di questi esempi rappresenta un argomento contro l'eternalismo, poiché l'eternalismo accetta l'idea che lungo l'asse temporale dello spaziotempo il cambiamento si verifichi! Sto tuttavia suggerendo che la coscienza sia un fenomeno intrinsecamente diverso, perché secondo l'ipotesi degli istanti-all'interno-di-un-istante di Barbour e Greene dovremmo essere coscienti all'interno di un singolo «fotogramma».

22 Ecco il passo completo di Pinker:

«È quasi impossibile immaginare di perdere la consapevolezza del *tempo*, lasciando l'ultimo pensiero fermo come un clacson inceppato, e continuare tuttavia ad avere una mente. Per Cartesio la distinzione tra il fisico e il mentale dipendeva da questa differenza. La materia è estesa nello spazio, ma la coscienza esiste nel tempo, quanto è certo che procede dall'“Io penso” all'“Io sono”». (Pinker 2007, trad. it. p. 199).

[23](#) Lockwood 2005.

[24](#) L'equazione della relatività ristretta mostra che, se esistessero particelle (tachioni) che viaggiano a una velocità superiore a quella della luce,

sarebbe possibile inviare segnali a ritroso nel tempo, alterando potenzialmente il passato. Strettamente parlando, non si tratterebbe di una forma di *viaggio* nel tempo, bensì di una comunicazione col passato e col futuro.

[25](#) Greene 2004 [trad. it. p. 167].

10:00 La spazializzazione del tempo nelle neuroscienze

1 Citato da Papert 1999. Non sono riuscito a trovare conferme indipendenti a questa citazione.

2 Citato da Droit-Volet 2003.

3 Piaget (1946) 1969.

4 Siegler e Richards 1979. Cfr. anche Matsuda 1996.

5 Piaget (1946) 1969 [trad. it. p. 297].

6 Walsh 2003; Núñez e Cooperrider 2013; Bender e Beller 2014.

7 Núñez e Cooperrider 2013.

8 Lakoff e Johnson (1980) 2003.

9 Núñez e Sweetser 2006.

10 McGlone e Harding 1998;
Boroditsky e Ramscar 2002.

11 Lakoff e Johnson (1980) 2003.

12 Un piede (*foot*) corrisponde a
30,48 cm [*N.d.T.*].

13 Price-Williams 1954.

14 Huang e Jones 1982. L'esistenza
degli effetti kappa e tau è stata provata
da molti studi diversi, sia in ambito
visivo che in ambito somatosensoriale
(Helson e King 1931, Cohen *et al.* 1953,
Sarrazin *et al.* 2004, Goldreich 2007,
Grondin *et al.* 2011).

15 Casasanto e Boroditsky 2008. Per
uno studio con risultati simili cfr. Coull

et al. 2015.

[16](#) Walsh 2003; Bueti e Walsh 2009.

[17](#) Xuan *et al.* 2007, Hayashi *et al.* 2013, Cai e Wang 2014.

[18](#) Ishihara *et al.* 2008, Kiesel e Vierck 2009.

[19](#) Saj *et al.* 2014.

[20](#) Pastalkova *et al.* 2008, Kraus *et al.* 2013, Genovesio e Tsujimoto 2014.

[21](#) Cfr. Calaprice 2005.

[22](#) È stato osservato che l'effetto kappa presenta delle analogie con la relatività ristretta, nel senso che l'orologio di un soggetto che osserva un oggetto in rapido movimento in un sistema di riferimento diverso, il suo

orologio di fatto risulterà accelerato, cioè il soggetto misurerà che è trascorso un tempo maggiore, analogamente al gemello rimasto in quiete del paradosso dei gemelli (Goldreich 2007). Ma, d'altra parte, nella relatività ristretta vi è un interscambio assoluto fra tempo e distanza. Localmente, la velocità e il tempo trascorso sono in relazione inversa, mentre nell'effetto kappa la durata percepita e la velocità sono proporzionali fra di loro.

23 Piaget per esempio affermò: «Per quanto possa apparire paradossale, le durate relative e i tempi propri della teoria di Einstein stanno al tempo assoluto come il tempo assoluto sta ai

tempi individuali e ai tempi locali dell'intuizione infantile» (citato da Sauer 2014). E inoltre: «Nell'universo macroscopico, tuttavia, la subordinazione del tempo rispetto alla velocità rimane fondamentale, dato che a velocità elevate il tempo relativistico incontra le stesse difficoltà che incontra l'idea di tempo del fanciullo» (Piaget 1972).

24 Si noti che questa è un'osservazione totalmente diversa da quella fatta nel capitolo precedente a proposito della sensazione soggettiva dello scorrere del tempo. A prescindere dalle distorsioni generate da una miriade di illusioni temporali, la nostra

sensazione soggettiva del passaggio del tempo deve trovare una spiegazione compatibile sia con la fisica che con le neuroscienze.

25 La strategia generale che consiste nel ricorrere alle esperienze precedenti e alle migliori stime attuali è detta teoria della decisione bayesiana (Kording 2007), e si ritiene che spieghi molti aspetti della percezione e del processo decisionale, compresa la formulazione delle valutazioni temporali (Collyer 1976, Goldreich 2007, Jazayeri e Shadlen 2010).

26 Smolin 2013, p. 30.

27 Questo punto è sottilmente diverso dal fatto che intuitivamente propendiamo

per il presentismo perché solo il presente sembra essere reale. Qui il punto è che, date le rappresentazioni astratte e matematiche del tempo come dimensione del tutto simile allo spazio, potremmo prediligere l'eternalismo perché gli esseri umani paiono concettualizzare il tempo in termini di spazio.

11:00 *Il viaggio mentale nel tempo*

1

<http://www.nytimes.com/2011/04/21/wo>

15 maggio 2015.

2 Suddendorf e Corballis 1997, 2007.

3 Tulving 2005.

4 Taylor *et al.* 1994.

5 Hassabis *et al.* 2007, Race *et al.* 2011, Kwan *et al.* 2012.

6 Tulving 1985.

7 Gilbert 2007.

8 Clayton e Dickinson 1999, Raby *et al.* 2007, Clayton *et al.* 2009.

9 Osvath e Persson 2013, Bourjade *et al.* 2014, Scarf *et al.* 2014. Per due libri divulgativi che affrontano la questione

del viaggio mentale nel tempo negli animali cfr. Corballis 2011, Suddendorf 2013.

10

<http://www.spectator.co.uk/features/5890-we-have-souls-then-so-do-chimps/>, 15 maggio 2015.

11 Gordon 2004. «I pirahã non hanno idea della propria età, né di concetti temporali del genere “da quanto tempo sai che...”» (Daniel Everett, comunicazione personale, 4 marzo 2009).

12 Everett 2008, p. 132.

13 Colapinto 2007.

14 Gli psicologi hanno cercato di creare una tassonomia delle prospettive

temporali individuali. Lo Zimbardo Time Perspective Inventory, per esempio, chiede ai soggetti di indicare in che misura, in una scala da uno a cinque, concordano con affermazione del tipo: *Non è possibile fare veri e propri progetti per il futuro perché le cose cambiano in continuazione; Trovo piacevole riandare con il pensiero al passato; Le cose raramente vanno a finire come mi aspettavo.* A seconda delle risposte, gli individui vengono assegnati a una delle cinque prospettive seguenti: passato-negativo, passato-positivo, presente-fatalista, presente-edonista, futuro (Zimbardo e Boyd 2008).

<http://www.cbsnews.com/news/seagypsies-saw-signs-in-the-waves/>, 15
maggio 2015.

16

<http://money.usnews.com/money/blogs/the-best-life/2013/06/20/retirement-shortfall-may-top-14-trillion>, 9
dicembre 2015.

17 James Surowiecki ha svolto una breve disamina dei problemi cronici che affliggono i fondi pensione in Surowiecki 2013; la citazione da Mark Twain è tratta dal suo articolo.

18 Kable e Glimcher 2007.

19 Critchfield e Kollins 2001, Wittmann e Paulus 2007, Seeyave *et al.* 2009, MacKillop *et al.* 2011.

20 Frederick *et al.* 2002.

21 Prelec e Simester 2001, Raghurir e Srivastava 2008.

22 Dico questo perché, essendo le risorse per tali ricompense attinte dalle commissioni che i rivenditori pagano ai gestori delle carte di credito, i rivenditori fissano i loro prezzi tenendo conto di queste commissioni.

23 Buonomano 2011, cap. 4.

24 Peters e Büchel 2010. Cfr. anche Hakimi e Hare 2015.

25 Herculano-Houzel 2009, Fox 2011.

26 Purves *et al.* 2008.

27 Jacobs *et al.* 2001, Wood e

Grafman 2003, Wise 2008, Fuster e Bressler 2014.

[28](#) Atance e O'Neill 2001, Fuster e Bressler 2014.

[29](#) Sellitto *et al.* 2010, Peters 2011. Qui ho un po' semplificato, dato che la corteccia prefrontale in realtà è suddivisa in un certo numero di regioni differenti, alcune delle quali si presume che abbiano una predilezione per le ricompense a breve scadenza.

[30](#) McClure *et al.* 2004.

[31](#) Botzung *et al.* 2008, Benoit e Schacter 2015.

[32](#) Hassabis *et al.* 2007, Race *et al.* 2011, Kwan *et al.* 2012.

[33](#) Gilbert 2007, Killingsworth e

Gilbert 2010.

[34](#) Everett 2008, p. 273.

12:00 La coscienza: un legame tra passato e futuro

1 Burr *et al.* 1994; Yarrow *et al.* 2001.

2 Koch 2004.

3 Kanabus *et al.* 2002, Alais e Cass 2010.

4 Van Wassenhove *et al.* 2007, Mégevand *et al.* 2013.

5 Ho semplificato un po' la faccenda; in realtà il sistema visivo ha un ritardo intrinseco. L'informazione visiva proveniente dalla retina può arrivare nella corteccia visiva 50 millisecondi pieni dopo che l'informazione proveniente dalla coclea è giunta nella

corteccia uditiva. Questo ritardo intrinseco è in gran parte una conseguenza del fatto che la fototrasduzione della retina è molto più lenta della trasduzione meccanica della coclea.

⁶ Fujisaki *et al.* 2004, Toida *et al.* 2014, Van der Burg *et al.* 2015.

⁷ Geldard e Sherrick 1972; Kilgard e Merzenich 1995, Goldreich e Tong 2013.

⁸ Dennett 1991, Buonomano 2011, Herzog *et al.* 2016.

⁹ Cfr. per esempio Dehaene e Changeux 2011, Kandel 2013.

¹⁰ Lamy *et al.* 2009. Cfr. anche Salti *et al.* 2015.

11 Dehaene 2014, p. 126. Per un altro esempio di come manipolazioni successive, che intervengono 400 ms dopo lo stimolo, possano alterare la percezione cosciente degli stimoli cfr. Scharnowski *et al.* 2009, Sergent *et al.* 2013.

12 Esistono una lunga e venerabile tradizione di studi filosofici e una tradizione più recente di studi neuroscientifici dedicati alla questione del libero arbitrio. Come introduzione consiglio gli articoli di Montague 2008; Haggard 2011, Nichols 2011, Smith 2011, e i libri di Dennett 2003, e Harris 2012.

14 Montague 2008.

15 Hawking 1996.

16 Penrose 1989, p. 558.

17 Lockwood 2005.

18 Anche se si è sostenuto che questa sensazione della scelta sia un'illusione che si sgretola a un esame più approfondito (Harris 2012).

19 Wegner 2002.

20 Hume (1739) 2000.

21 Huxley (1894) 1911, p. 244.

22 Fried *et al.* 2011.

23 Libet *et al.* 1983, Lau *et al.* 2007, Haggard 2008, Soon *et al.* 2008, Murakami *et al.* 2014.

24 Haggard 2011.

25 Dehaene 2014, p. 91. Lo scrittore e giornalista Adam Gopnik ha espresso questa tesi ricorrendo alla metafora del portavoce: «Ciò che chiamiamo coscienza è solo un'illusione, e intrattiene con il funzionamento delle nostre menti reali la stessa relazione che il portavoce della Casa Bianca intrattiene con i processi che si svolgono all'interno della Casa Bianca di Bush: essa è lì per razionalizzare e trovare motivazioni sistematiche a sentimenti e decisioni provenienti da forze opache e nascoste, dei cui propositi capricciosi e irrazionali è consapevole solo molto dopo il fatto» («The New Yorker», 4

luglio 2005).

[26](#) Gazzaniga e Steven 2005, Gazzaniga 2011.

[27](#) Citato da Zeeya Merali, *Tomorrow Never Was*, in «Discover», giugno 2015.

[28](#) Nichols 2011, Shariff e Vohs 2014.

[29](#) Nell'ambito del *Model Penal Code* [il «Codice Penale Modello» elaborato negli Stati Uniti nel 1962 e proposto come modello di riferimento ai singoli Stati della federazione, ciascuno dei quali possiede un proprio codice penale – *N.d.T.*], questi tre scenari corrisponderebbero pressappoco alle seguenti modalità mentali: *purposely*,

recklessly/negligently e strict liability.

30 Faccio qui riferimento all'equazione di Wheeler-DeWitt, basata sul tentativo di fondere la relatività generale e la meccanica quantistica. Con sconcerto di molti scienziati, questo tentativo ha prodotto un'equazione priva di parametri temporali, il che pare condurre alla conclusione che il tempo non esiste, una tesi avanzata da fisici come Julian Barbour e Carlo Rovelli. Per eccellenti trattazioni del ruolo del tempo nella meccanica quantistica e dell'equazione di Wheeler-DeWitt cfr. Barbour 1999, Rovelli 2004, Lockwood 2005, Callender 2010a, Smolin 2013.

31 Koch 2004, Dehaene 2014.

Indice dei nomi e delle opere

Adams, Douglas

Agostino, santo

Barbour, Julian

Baron-Cohen, Sacha

Benzer, Seymour

Boltzmann, Ludwig

*Borat. Studio culturale sull'America a
beneficio della gloriosa nazione del
Kazakistan* (film)

Borges, Jorge Luis

Boroditsky, Lera

Brain Bugs (Buonomano)

Bundy, Willard

Callender, Craig

Canto di Natale (Dickens)

Carnap, Rudolf

Clayton, Nicola

Corballis, Michael

Darwin, Charles

Davies, Paul

Dehaene, Stanislas

Denton, Jeremiah

Dickens, Charles

Dobzhansky, Theodosius

Duncan, David Ewing

Einstein, Albert fig.

El Anacronópete (Gaspard)

Elettrodinamica dei corpi in movimento, L'

(Einstein)

Ellis, George

Euclide

Everett, Daniel

Fee, Michale

Feynman, Richard
Follini, Stefania
Franklin, Benjamin

Galilei, Galileo

Gaspard, Enrique

Gilbert, Daniel

Giulio Cesare

Goel, Anu

Goodall, Jane

Gopnik, Adam

Gracián, Baltasar

Greene, Brian

Gregorio XIII, papa

Harrison, John

Hawking, Stephen

Heim, Albert

Hendrix, Jimi

Hockenberry, John

Hume, David

Huxley, Thomas

Huygens, Christiaan

Infeld, Leopold

Interstellar (film)

James, William

Johnson, Hope

Johnson, Mark

Konopka, Ron

Lakoff, George

Le Guen, Véronique

Leibniz, Gottfried

Lincoln, Abraham

Lockwood, Michael

Long, Michael

Looper – In fuga dal passato (film)

Lorentz, Hendrik

Lorenz, Edward

Macchina del tempo, La (Wells)

Mahābhārata

Mattatoio n. 5 (Vonnegut)

Midnight in Paris (film)

Parmenide

Patel, Aniruddh

Paton, Joe

Penrose, Roger

Piaget, Jean

Pinker, Steven

Poincaré, Henri

Popper, Karl

Price, Huw

Principi di neuroscienze (Kandel *et al.*)

Principi di psicologia (James)

Ricomincio da capo (film)

Ritorno al futuro (film)

Ritorno al futuro (film)

Rosbash, Michael

Rovelli, Carlos

Sabiniano, papa

Shakespeare, William

Shovell, Clowdisley

Shuler, Marshall

Siffre, Michel

Smart, Jack

Smolin, Lee

Sobel, Dava

Sompolinsky, Haim

Star Trek (film)

Suddendorf, Thomas

*Sviluppo della nozione di tempo nel
bambino, Lo* (Piaget)

Terminator (film)

Time's Arrow and Archimedes' Point (Price)

Tulving, Endel

Twain, Mark

Un amore all'improvviso (film)

Vonnegut, Kurt

Wearing, Clive

Wegner, Daniel

Wells, Herbert George

Weyl, Herman

Wheeler, John

Wright, Beverly

www.illibraio.it



Il sito di chi ama leggere

Ti è piaciuto questo libro?

Vuoi scoprire nuovi autori?

Vieni a trovarci su [illibraio.it](http://www.illibraio.it),
dove potrai:

- scoprire le novità editoriali e sfogliare le prime pagine in anteprima
- seguire i generi letterari

che preferisci

- accedere a contenuti gratuiti: racconti, articoli, interviste e approfondimenti
- leggere la trama dei libri, conoscere i dietro le quinte dei casi editoriali, guardare i booktrailer
- iscriverti alla nostra newsletter settimanale
- unirti a migliaia di appassionati lettori sui

nostri account [facebook](#),
[twitter](#), [google+](#)

«La vita di un libro non finisce
con l'ultima pagina»

IL LIBRAIO