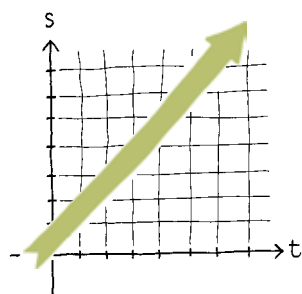


# LA FISICA E L'EVOLUZIONE

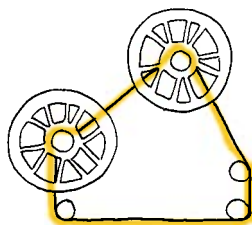
Che cosa succede quando si introduce in fisica il concetto di tempo come realtà irreversibile? Ce lo racconta una docente e comunicatrice scientifica, partendo dagli studi di Clausius per arrivare alla nuova visione proposta dal fisico Enzo Tiezzi.

FRANCESCA E. MAGNI

Spazio e tempo sono da sempre oggetto dell'indagine scientifica e della speculazione filosofica. Il tempo che sperimentiamo nella nostra vita quotidiana è "asimmetrico" perché può scorrere solo in avanti, verso il futuro. In fisica invece la maggior parte delle leggi non cambia se si inverte il corso degli eventi. Il tempo, infatti, nella fisica classica così come anche nella meccanica quantistica, è una coordinata come lo spazio e non è irrimediabile come il tempo della vita.



In termini tecnici si dice che le equazioni della fisica sono reversibili rispetto al tempo. I sistemi fisici possono cioè ritornare al loro stato iniziale "senza lasciare tracce", rifacendo all'indietro i passi fatti in avanti, come quando si riavvolge un film.

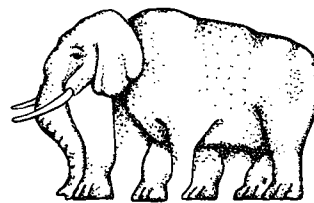


Spesso si parla di "freccia del tempo" per indicare quelle situazioni che si evolvono nel tempo e che non possono mai tornare indietro come se nulla fosse successo, modificandosi quindi in maniera irreversibile. È il caso di tutte quelle situazioni che costituiscono l'oggetto di studio di discipline basate su una prospettiva storica, come la biologia o la geologia. Per la fisica in generale, invece,

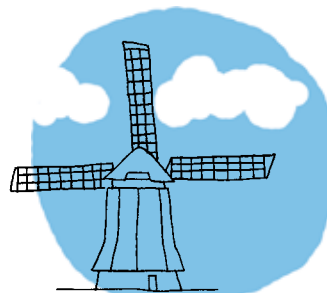
non esiste una vera e propria "freccia del tempo" perché – in linea di principio – non esiste nessun motivo per il quale il tempo sia costretto a scorrere in un'unica direzione. Il termine "freccia del tempo" fu inventato dall'astronomo inglese Sir Arthur Eddington (1882 – 1944).



Bisogna aggiungere che i fisici hanno in generale considerato il tempo come una pura illusione. Emblematiche sono le dichiarazioni di Albert Einstein alla morte del suo caro amico Michele Besso: «Egli mi ha preceduto di un poco nel congelarsi da questo strano mondo. Non significa niente. Per noi che crediamo nella fisica, la divisione tra passato, presente e futuro ha solo il valore di un'ostinata illusione» [1].

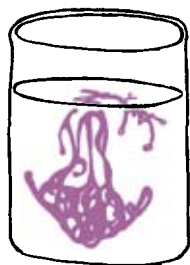


In fisica, il tempo compare per la prima volta come realtà irreversibile grazie alla termodinamica. Nata come scienza del calore, questa disciplina è lo studio delle trasformazioni dell'energia nelle sue varie forme.



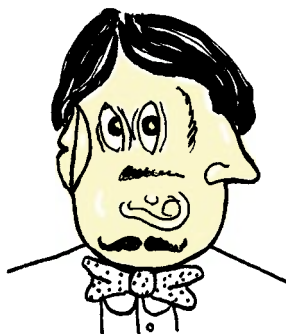
## I fenomeni fisici presentano spontaneamente una direzione privilegiata, dall'ordine verso il disordine

In particolare, il secondo principio della termodinamica afferma che in natura esistono delle direzioni privilegiate per le trasformazioni spontanee. Esiste cioè una "freccia del tempo" anche in fisica. Basti pensare a questo semplice esperimento che chiunque può fare: se si mettono a contatto un corpo caldo e uno freddo, il calore passa sempre spontaneamente dal corpo caldo a quello freddo e non succede mai il viceversa. Oppure: se si prova a gettare una goccia di inchiostro in un bicchiere d'acqua, si osserva che essa spontaneamente si diluirà e colorerà l'acqua, mentre anche aspettando milioni di anni, non succederà mai che da solo l'inchiostro disciolto si separi dall'acqua per tornare ad assumere la forma originaria di goccia. Siamo quindi di fronte a un fenomeno fisico irreversibile.

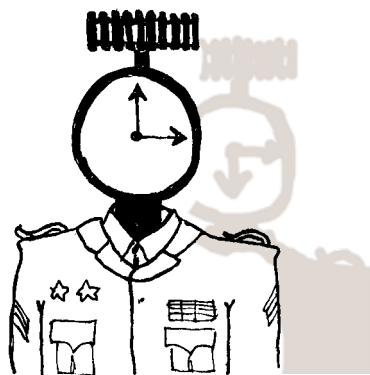


Fu Rudolf Julius Emanuel Clausius a formulare, all'incirca negli stessi anni (1865) della pubblicazione de *L'origine delle specie* di Darwin (1859), il secondo principio della termodinamica, insieme al concetto di entropia. Il termine entropia, coniato dallo stesso Clausius, contiene l'idea del tempo che scorre: deriva dal greco **τροπή** (trasformazione) o da **εντροπή** (conversione, mutazione o anche confusione). L'entropia ha molte interpretazioni e una di queste afferma che essa è una misura del disordine di un sistema. Per esempio: più una stanza è disordinata... maggiore è la sua entropia! Il secondo principio della termodinamica afferma che, se sono lasciati a se stessi, i fenomeni in natura evolveranno sempre verso lo stato di massimo disordine, cioè della massima entropia. E mano a mano

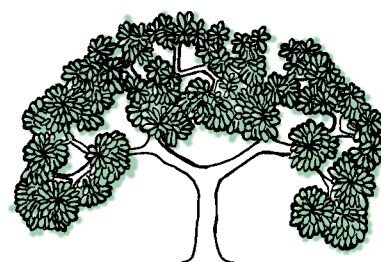
che l'entropia aumenta, anche l'energia si deteriora sempre di più (cioè diviene sempre meno utilizzabile). «Il massimo di entropia, che corrisponde allo stato di equilibrio di un sistema, è uno stato in cui l'energia è completamente degradata e non è più capace di fornire lavoro. L'entropia è quindi quel concetto che ci indica la direzione degli eventi», spiega il fisico Enzo Tiezzi.



Con l'introduzione del concetto di entropia, quindi, alla visione statica della dinamica classica si sovrappone una visione evolutiva. I fenomeni fisici presentano spontaneamente una direzione privilegiata, dall'ordine verso il disordine, verso forme di energia sempre più degradata e sono soggetti, come tutti, all'irreversibile "dominio del tempo". Il tempo scorre nella direzione in cui l'energia si degrada e l'entropia aumenta.



Ma il connotato del secondo principio non è affatto negativo come potrebbe sembrare, anzi: è proprio grazie all'irreversibilità dei sistemi "lontani dall'equilibrio" che possono nascere fenomeni nuovi e imprevedibili sempre più complessi e organizzati.



È stato Ilya Prigogine, premio Nobel per la chimica nel 1977, grazie ai suoi studi e alle sue teorie sulle strutture dissipative, a considerare definitivamente il tempo come realtà irreversibile. Il tempo è un fattore importantissimo, che regola e dirige l'evoluzione e il comportamento dei sistemi complessi. «Oggi penso che possiamo rifiutare la tentazione di una separazione radicale fra scienza e tempo», afferma Prigogine. «Non esiste un tempo dei fisici che sia differente da un tempo dei filosofi. L'irreversibilità non può più essere rifiutata come apparenza e con ciò stesso essa ci fornisce quella prospettiva che mancava a Einstein per poter affermare la realtà del tempo in quanto successione del passato, del presente e del futuro» [2].





## VERSO UNA FISICA EVOLUTIVA

Il fatto che il concetto di tempo sia diventato non più un'illusione ma una proprietà reale dei sistemi, in grado di modificarli irreversibilmente, è un passo fondamentale in fisica. In questo modo, i processi evolutivi, importantissimi in biologia, assumono un ruolo decisivo anche per i fenomeni fisici. E più in particolare per i fenomeni che appartengono alla cosiddetta termodinamica di non equilibrio, la parte della fisica che si occupa delle trasformazioni di energia che avvengono in sistemi lontani dall'equilibrio.

### Che sistema sei?

Il primo a occuparsi di questi sistemi è stato, alla fine degli anni sessanta, Ilya Prigogine, che ha coniato il termine *struttura dissipativa*. Per capire di che cosa si tratta, bisogna prima di tutto distinguere, in base al tipo di "rapporto" che hanno con l'ambiente circostante, tre tipi di sistemi: isolato, chiuso e aperto. Un sistema è isolato se non scambia nulla con l'esterno (come un liquido

contenuto in un thermos ermeticamente chiuso); chiuso se scambia solo energia ma non materia (come una bottiglia ermeticamente chiusa che quindi non può far uscire o entrare liquido, ma che può assorbire energia tramite passaggio di calore, riscaldandosi o anche raffreddandosi); aperto quando scambia sia energia sia materia sia informazione con l'esterno. Il sistema isolato è praticamente quasi impossibile da realizzare, perché un minimo scambio di energia con l'esterno è inevitabile: viene quindi catalogato tra i cosiddetti sistemi fisici "ideali", molto utili dal punto di vista teorico (e molto amati da Einstein). Il sistema chiuso è difficile da realizzare in maniera perfetta: se si pensa alla bottiglia sigillata, per esempio, ci si rende conto che qualche molecola d'aria passerà comunque tra l'esterno e l'interno; di conseguenza sono i sistemi aperti quelli che si incontrano nelle esperienze reali.


### Nascita di ordine dal disordine

Una struttura dissipativa è un sistema aperto che lavora lontano dall'equilibrio. In queste strutture, il continuo flusso di energia con l'esterno influenza il comportamento di tutto il sistema: possono nascere nuove proprietà imprevedibili e il sistema, che ogni volta si riorganizza (o meglio si auto-organizza), può evolvere verso stadi e forme sempre più complesse. In questi sistemi, quindi, si possono creare inaspettatamente delle strutture ordinate, a partire da uno stato iniziale indifferenziato, instabile e disordinato: i fisici chiamano questo fenomeno "nascita di ordine dal disordine". Un esempio di struttura dissipativa sono le celle di Bénard, bellissime cellette esagonali che emergono spontaneamente – a una data temperatura – su un sottile strato di liquido riscaldato alla base con un flusso costante di calore.

### Una nuova disciplina

«All'equilibrio l'energia e la materia sono cieche, lontano dall'equilibrio cominciano a "vedere"»: questa è la frase di Prigogine citata nel prologo del libro *Verso una fisica evolutiva* di Enzo Tiezzi, professore di chimica fisica all'Università di Siena [3].

Da alcuni anni Tiezzi e il suo gruppo di ricerca stanno lavorando alle frontiere della termodinamica e della biologia evuzionistica, per creare le basi di una nuova disciplina che si chiama fisica evolutiva o termodinamica ecologica

 Un esempio di reazione chimica oscillante di Belousov-Zhabotinsky fatta avvenire in una capsula Petri.



## È grazie all'irreversibilità dei sistemi "lontani dall'equilibrio" che possono nascere fenomeni nuovi e imprevedibili sempre più complessi e organizzati

(ecodinamica). Questa disciplina aspira a sviluppare una proposta di reciproca fecondazione tra Charles Darwin e Ilya Prigogine, e contribuisce a fondare e arricchire la fisica dei sistemi complessi. Per Enzo Tiezzi, l'entropia e l'irreversibilità sono alla base dello sviluppo degli ecosistemi, della loro storia e dell'intera evoluzione.

### Una matematica "irreversibile"

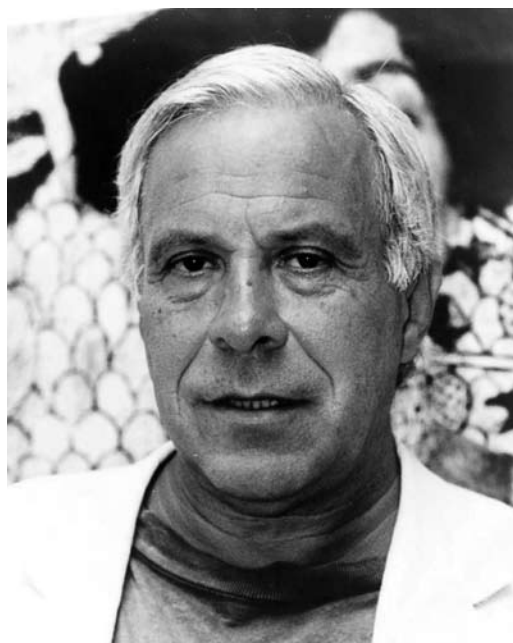
Per Tiezzi, lo spazio è reversibile e il tempo irreversibile e questo comporta un approccio teorico e di conseguenza matematico diverso da quello tradizionale. In termini più tecnici, Tiezzi non utilizza più l'approccio delle "funzioni di stato" termodinamiche ma adotta quello delle "funzioni goal" e delle "configurazioni dei processi" in grado di descrivere l'evoluzione dei sistemi incorporando in sé lo scorrere del tempo. I modelli ecodinamici si basano su relazioni e su funzioni che evolvono esse stesse nel tempo.

«Le leggi fondamentali della chimica fisica classica devono essere riviste, alla luce di una nuova *Gestalt* del tempo», afferma Tiezzi, dove per *Gestalt* si intende una "rappresentazione-visione". «Le equazioni devono essere irreversibili rispetto al tempo, non basate su una rigida gabbia (modello), ma aperte abbastanza da contenere elementi narrativi».

### Dalle molecole ai... pipistrelli!

La ricerca di Tiezzi si occupa inevitabilmente di molte discipline e sistemi: dalle reazioni chimiche fino alla sostenibilità delle città... Per esempio, una tra le tante applicazioni svolte dal suo gruppo di lavoro è lo studio dei suoni della natura. I ricercatori di Siena hanno registrato i suoni emessi da alcuni animali, come quelli di differenti specie di pipistrelli e sono riusciti a realizzare un "analizzatore di impronte vocali" che a ogni animale associa uno specifico valore matematico. Insomma, hanno dimostrato con i fatti che la biodiversità può essere misurata! E tutto grazie all'analisi al computer dei suoni degli animali, che sfrutta gli strumenti matematici della scienza della complessità.

Abbiamo chiesto direttamente al professor Tiezzi, vincitore nel 2004 della medaglia d'oro Blaise Pascal dell'European Academy of Science for Physics and Chemistry, di parlarci del suo lavoro.



Enzo Tiezzi.

**L'ecodinamica ha come base la centralità dell'entropia e assegna al tempo un ruolo costruttivo fondamentale. In *Verso una fisica evolutiva* lei cita la frase di Prigogine: «Il tempo è nelle relazioni fra le particelle» Che cos'è dunque il tempo per lei?**

Ecodinamica è un neologismo che ho creato proprio parlando con Prigogine, mettendo insieme l'ecologia con la termodinamica: è una disciplina che vuole studiare gli ecosistemi con particolare riferimento alle dinamiche temporali. Quindi in essa il tempo diventa protagonista.

Il tempo ha molto a che fare con le relazioni, che sono le strutture che cambiano con le loro informazioni: esso esiste ovviamente in tutti i sistemi viventi e si manifesta attraverso relazioni che cambiano. Se i miei capelli sono bianchi oggi e non lo erano quando ero un ragazzo è perché si sono stabilite nel tempo delle relazioni con l'ambiente, con le cose che io mangio, con le cellule del mio corpo che cambiano la struttura delle cose. Quindi bisogna vedere il tempo, secondo Prigogine e secondo me, da qui in avanti proprio come una proprietà della materia. Non solo e soltanto lo spazio in funzione del tempo ma il tempo come proprietà intrinseca della materia. Allora ecco che un sistema vivente, una pianta, un uomo, hanno un loro tempo interno che



⬇️ Un vortice è una struttura che emerge in un fluido in maniera inaspettata e non prevedibile a partire dalla conoscenza del comportamento delle singole molecole.



ISTOCKPHOTO

## LA SCIENZA DELLA COMPLESSITÀ: ALCUNE PAROLE CHIAVE

La scienza dei sistemi complessi interessa diversi campi, dai sistemi laser ai fenomeni atmosferici fino all'evoluzione dei sistemi biologici. In generale, un sistema si dice **complesso** se è costituito da un elevato numero di elementi che interagiscono tra loro, come il cervello umano (il sistema complesso per eccellenza). Per descrivere il comportamento di un tale sistema non basta capire il funzionamento di ogni singola parte, perché il comportamento globale di tutto il sistema ha proprietà diverse da quelle

dei singoli elementi. Così, per capire come funziona il cervello non è sufficiente sapere tutto di un singolo neurone... Per i sistemi complessi vale infatti la famosa osservazione di Blaise Pascal: «L'intero è più della somma delle parti». Una parola chiave fondamentale per i sistemi complessi è **proprietà emergente**, la proprietà che caratterizza quei comportamenti globali di tutto il sistema che “emergono” spontaneamente all'improvviso come novità e che non possono essere previsti. Per esempio: quando finiamo di fare il bagno e apriamo lo scarico dell'acqua, quasi sempre si forma un vortice nella vasca all'altezza dello scarico stesso; il vortice, però, è una forma di organizzazione dell'acqua inimmaginabile sia a livello delle singole molecole sia a livello globale del liquido fermo presente nella vasca prima di aprire il tappo. Ecco perché è così difficile prevedere i vortici nell'atmosfera, come i cicloni, che provocano distruzione e catastrofi. Una seconda parola chiave è **auto-organizzazione** e cioè la capacità del sistema di riorganizzarsi da solo in risposta a uno stimolo esterno. In questo modo, i sistemi riescono a “inventarsi” nuove configurazioni autonomamente e sono cioè in grado di evolversi. I sistemi complessi sono inoltre sistemi aperti, dove per “aperto” si intende un sistema che interagisce con l'ambiente (attraverso scambi di energia, materia e informazione).

caratterizza quell'individuo. Nel vivente questo è fondamentale e si vede benissimo negli alberi d'autunno che perdono le foglie o nelle nuove gemme che emergono a primavera o negli altri esseri viventi che invecchiano perché hanno il tempo dentro di sé.

### Può parlarci di alcune applicazioni della fisica evolutiva?

Vi sono applicazioni in molti campi. Un esempio è quello delle reazioni oscillanti o reazioni di Belousov-Zhabotinsky, che danno luogo all'emergere di novità, strutture che prima non c'erano e che improvvisamente appaiono grazie alla proprietà del sistema di auto-organizzarsi. Sono reazioni chimiche che mettono in evidenza i parametri della fisica evolutiva e in particolare la capacità di emergere nel tempo di strutture che prima non erano presenti nel sistema. Le applicazioni più importanti, tuttavia, sono quelle relative agli ecosistemi e alla sostenibilità: il mio gruppo di ricerca, per esempio, si è occupato delle barene, piccole isolette che emergono nella laguna di Venezia. Sono ecosistemi vitali che per emergere hanno bisogno di un po' di sabbia ma anche di un'interruzione, una “interbase”, come un tronco d'albero o una piccola palizzata piantata. Con il consorzio Venezia Nuova abbiamo fatto degli esperimenti pubblicati di recente: attorno alle palizzate e sott'acqua si insediano anzitutto dei vegetali, poi questa flora emerge in superficie e

comincia a ospitare alcuni animaletti. Quando tutta la barena emerge in superficie, compaiono i primi nidi di uccelli e così via...

### I modelli che il suo gruppo di ricerca ha messo a punto negli ultimi mesi hanno una sigla: Coos. Di che cosa si tratta?

Coos è la famosa isola dove è nato Ippocrate, ma è anche un acronimo per Confined Ontic Open Systems: sistemi aperti “confinati” o “protetti” che potrebbero far pensare a una contraddizione: se il sistema è aperto (quindi scambia energia, materia e informazione con l'ambiente esterno) non può essere protetto; protetto, però, significa che gli scambi ci possono anche essere, solo che il sistema in qualche modo sceglie che cosa tenere e che cosa adoperare. Posso fare due esempi, due metafore: una città rinascimentale con le mura o la stessa laguna di Venezia, che dette luogo alla creazione della città di Venezia perché era la laguna che proteggeva i suoi abitanti. L'aggettivo “ontic” vuol dire che il sistema porta con sé tutta la memoria dell'evoluzione biologica (o culturale o storica). Nel campo della laguna si parla di evoluzione vegetale e animale che c'è stata prima e che porta con sé la sua informazione, la sua ontologia, cioè tutta l'interesse dell'informazione nel tempo. Se questo avviene, questo sistema è in grado di creare qualche cosa di buono, di bello, è in grado di dare luogo a delle nuove nascite in armonia con la storia evolutiva precedente.



## IN RETE!

**Ilya Prigogine** Video in cui il premio Nobel parla della prima rappresentazione storica del rapporto spazio/tempo [www.youtube.com/watch?v=xkx0M6WT3mU&feature=related](http://www.youtube.com/watch?v=xkx0M6WT3mU&feature=related)

**Entropia a teatro** Sito dello spettacolo S=KlogW dedicato al secondo principio della termodinamica <http://entropia.teatrodellelefante.com>



## PER APPROFONDIRE

- G. Bocchi e M. Ceruti (a cura di), *La sfida della complessità*, Mondadori, Milano 2007.
- I. Prigogine, I. Stengers, *La nuova alleanza*, Einaudi, Torino 1981.
- G. Zanarini, *Il senso del tempo. La prospettiva temporale della scienza*, "Cultura e scuola", 1993, n. 127, pp. 162-175.



## RISORSE

1. A. Einstein, *Opere scelte* (trad. it. di E. Bellone), Bollati Boringhieri, Torino 1988, p. 707.
2. I. Prigogine, *L'esplorazione della complessità in La sfida della complessità* a cura di G. Bocchi e M. Ceruti, Feltrinelli, Milano 1985, p. 183.
3. E. Tiezzi, *Verso una fisica evolutiva. Natura e tempo*, Donzelli, Roma 2006.



### FRANCESCA E. MAGNI

laureata in Fisica, insegnante e pubblicitaria. Ha collaborato e collabora con riviste di comunicazione della scienza sia cartacee sia online. Cura il blog *Lineediscienza* <http://lineediscienza.linxedizioni.it>



Immagine di barene nella laguna veneta.

### Quando e come è nato questo filone di ricerca? Ci pensava già da bambino come Einstein con la luce oppure è stato un caso?

La risposta certa a questa domanda non esiste. Non c'è dubbio che in tutti i miei studi, dalle scuole medie al liceo, sono sempre stato affascinato dal problema del tempo. Non mi aveva mai convinto il famoso paradosso dei due gemelli di Einstein: lo criticai di fronte al mio professore di fisica in prima liceo! I miei riferimenti sono la scuola filosofica di Mileto, gli scritti di Epicuro e Lucrezio, che fin dalla scuola superiore mi hanno affascinato totalmente.

Quindi è un interesse che viene da lontano, però poi – come sempre – ci sono gli incontri fortunati

e io ne ho avuto uno molto fortunato, conoscendo Prigogine e diventandone allievo. Prigogine mi ha aperto gli occhi su molte cose ed è anche diventato un mio caro amico. C'è un altro punto: sono curioso di queste cose anche perché sono una persona che ha sempre girato nei boschi: fin da piccolo, con mio nonno, a vedere gli animali. E poi c'è la mia frequentazione con gli artisti: ne cito uno per tutti, il grande scultore abruzzese Pietro Cascella, purtroppo scomparso l'anno passato. Gli artisti mi hanno insegnato molto: l'importanza della bellezza nelle cose, per esempio, o del ruolo dei colori nell'evoluzione biologica. ➔