

# Figli della seconda legge

## La vita nel flusso dell'entropia: tra termodinamica ed evoluzione

### Introduzione

La vita è un fenomeno straordinario: un'organizzazione di materia altamente complessa e improbabile, eppure perfettamente compatibile con le leggi fisiche dell'universo. In particolare, la **Seconda Legge della Termodinamica** ci dice che l'entropia – una misura del disordine o della dispersione dell'energia – tende ad aumentare in un sistema chiuso. Come si concilia questo principio con l'esistenza di organismi ordinati, con genomi codificanti informazioni, cervelli coscienti e persino intere culture? In questo approfondimento esamineremo la vita come **fenomeno che canalizza l'entropia**, ossia che **dissipa energia aumentando l'entropia dell'ambiente** mentre costruisce e mantiene strutture locali ordinate [1][2]. Integreremo prospettive dalla **termodinamica statistica**, dalla **teoria dell'auto-organizzazione**, dalla **biologia evolutiva**, dalla **filosofia della mente e dell'identità** e dalla **fisica moderna**. L'obiettivo è mostrare come la vita emerga come un'**improbabile ma possibile configurazione di materia** nel contesto della Seconda Legge, e come l'evoluzione e la stabilizzazione di strutture complesse (dal genoma al cervello, dalla mente fino alla cultura) rappresentino una risposta efficiente al flusso entropico dell'ambiente. Esploreremo inoltre il confronto tra le visioni classiche e moderne dell'entropia – inclusa l'idea di *entropia negativa* – il ruolo dell'informazione nei sistemi viventi, e infine l'impatto di queste idee sulla nostra comprensione dell'identità umana e del nostro posto nell'universo.

**Nota:** In questo testo, "ordine" e "disordine" saranno usati in senso metaforico, come sinonimi rispettivamente di bassa e alta entropia. In fisica, però, non esistono definizioni univoche per questi termini: possono riferirsi al passaggio da stati meno probabili (ordine) a stati più probabili (disordine) o viceversa.

### Entropia e Seconda Legge: dalle visioni classiche a Boltzmann

La Seconda Legge della Termodinamica afferma che *in un sistema chiuso* l'entropia totale non può che aumentare o, nel migliore dei casi, restare costante. Nella formulazione classica di Rudolf Clausius (1865), l'entropia è legata al calore e alla temperatura: nei processi spontanei il calore fluisce dai corpi caldi a quelli freddi, *mai il contrario*, a meno di interventi esterni. Questa irreversibilità conferisce al tempo una direzione: come nota il fisico Carlo Rovelli, *"l'aumento costante dell'entropia è l'unica realtà fisica che conferisce al tempo una direzione"*, definendo la **freccia del tempo** [3].

Già nell'Ottocento venne compreso che l'entropia cresce perché esistono **molti più modi (microstati) per essere disordinati che ordinati**. *Ludwig Boltzmann* formalizzò questa idea nella **termodinamica statistica**: ogni stato macroscopico ha un certo numero  $W$  di configurazioni microscopiche compatibili, e l'entropia  $S$  misura questa "moltitudine" tramite la famosa formula  $S = k_B \ln W$  (non è necessario comprendere la formula matematica per cogliere il concetto). È a Ludwig Boltzmann che dobbiamo questa intuizione fondamentale: egli fu il primo a comprendere che la freccia del tempo, l'emergere della vita e l'esistenza stessa derivano da leggi statistiche. La sua intuizione pionieristica ha aperto la strada alla fisica moderna, influenzando profondamente discipline come la meccanica quantistica, la teoria dell'informazione e la biologia evolutiva. Un tributo doveroso a un pensatore visionario, che vide ordine e significato laddove altri scorgevano soltanto caos. Boltzmann, tuttavia, fu inizialmente incompreso e persino osteggiato dalla comunità scientifica del suo tempo. Sensibile e incline a frequenti crisi depressive, soffrì molto per l'isolamento intellettuale a cui fu sottoposto e purtroppo morì suicida nel 1906. Sulla sua tomba, come

eterno tributo alla sua geniale intuizione, è incisa la celebre formula dell'entropia nella forma originale:  $S = k \cdot \log W$  [4]. Uno stato altamente ordinato (ad esempio tutte le molecole di un gas raccolte in un angolo del recipiente) ha pochi microstati possibili, quindi bassa entropia; uno stato disordinato (gas uniformemente disperso) ha  $W$  enorme e dunque alta entropia. La Seconda Legge, in termini statistici, esprime semplicemente la **tendenza probabile** di un sistema a evolvere verso configurazioni più probabili (più disordinate), poiché sono numericamente prevalenti. Come illustra *Richard Dawkins*, **l'entropia viene spesso descritta come disordine**, ma per certi versi il termine **“mescolanza”**, coniato da **Willard Gibbs**, è più appropriato. Non c'è bisogno di immaginare una “forza” che spinga una biblioteca verso il disordine; basta lasciarla senza un bibliotecario attivo e, col tempo, i libri andranno fuori posto, perché le configurazioni disordinate dei libri sugli scaffali sono immensamente più numerose di quelle ordinate. Allo stesso modo, l'universo non ha “un'inclinazione morale” verso il caos: semplicemente ci sono più modi di essere caotici che ordinati, e senza lavoro esterno l'ordine si degrada spontaneamente [2].

**Visione classica vs visione moderna dell'entropia:** nel contesto classico (Clausius, Lord Kelvin), l'entropia veniva associata alla perdita di capacità di compiere lavoro utile e all'irrecuperabilità di parte dell'energia in ogni trasformazione, in continuità con le intuizioni pionieristiche di Sadi Carnot sull'efficienza dei motori termici. Boltzmann introdusse la visione microscopica probabilistica, che fu rivoluzionaria: mostrò che l'irreversibilità nasce dalla statistica di grandi numeri, non da un principio assoluto di “degrado cosmico”. Nel Novecento, con l'avvento della teoria dell'informazione, **entropia** acquisì anche un significato legato all'ignoranza o all'incertezza su uno stato: Claude *Shannon* nel 1948 definì l'entropia informativa come la misura dell'incertezza in un messaggio (formalmente simile alla formula di Boltzmann) [5]. Questo ponte tra termodinamica e informazione portò a nuove interpretazioni: si parlò di **“entropia come disordine”** ma anche di entropia come **perdita di informazione** su un sistema. La *visione moderna* tende a unire queste prospettive: l'entropia è vista come **dispersione di energia e informazione** – un aumento di entropia corrisponde a un aumento del disordine e parallelamente a una perdita di informazione distinguibile sul sistema.

Un punto importante è che **l'entropia può diminuire localmente** se il sistema non è chiuso. La Terra, ad esempio, riceve un flusso continuo di energia dal Sole (un sistema esterno caldo) e può esportare entropia nello spazio (ad esempio sotto forma di radiazione infrarossa). Questo crea le condizioni per **ridurre l'entropia localmente** sulla Terra, *senza violare* la Seconda Legge, perché l'entropia totale (incluso Sole+Terra+spazio) aumenta comunque [1]. In termini pratici: l'ordine può aumentare in un sottosistema se altrove l'entropia aumenta di più. È qui che entra in gioco la possibilità della vita.

### **La vita e l'“entropia negativa”: ordine locale in un universo verso il disordine**

Nel 1944 il fisico *Erwin Schrödinger*, nel saggio **“What Is Life?”**, affrontò il paradosso di organismi altamente ordinati in un universo soggetto al disordine crescente. Schrödinger conì il termine **“entropia negativa”** (o *negentropia*) per indicare ciò di cui gli esseri viventi si nutrono. Un organismo deve costantemente **assorbire ordine dall'esterno** per compensare l'aumento di entropia interno dovuto al metabolismo. In altre parole, la vita *vive* esportando entropia all'esterno. Esempio classico: **una pianta verde** assorbe fotoni ad alta energia dal Sole (bassa entropia), li utilizza per sintetizzare zuccheri e tessuti ordinati, ed emette fotoni infrarossi a energia più bassa (più entropici) verso l'ambiente [1]. Il bilancio totale vede l'entropia dell'universo aumentare (il flusso di energia solare degradato in calore), ma la pianta riesce a mantenere o aumentare il proprio ordine interno consumando **“entropia negativa”** disponibile nell'ambiente. Schrödinger inizialmente parlò di entropia negativa in senso letterale, anche se in edizioni successive chiarì che in termini termodinamici più rigorosi gli organismi consumano **energia libera** (energia utilizzabile per compiere lavoro)

[6]. In ogni caso, la sua intuizione fu fondamentale: **la vita non viola la Seconda Legge**, anzi ne è perfettamente conforme, ma è un fenomeno di **entropia che fluisce** attraverso strutture organizzate.

Questa idea era stata anticipata in qualche forma da *Boltzmann*. Egli ragionò, già nel 1875, che *“la lotta generale per l’esistenza delle creature viventi non è una lotta per la materia o per l’energia – che abbondano – ma una lotta per l’entropia [negativa], resa disponibile dalla transizione di energia dal Sole caldo alla Terra fredda”*. In altri termini, gli organismi competono per catturare **energia utile** e mantenere basse le proprie entropie interne. Il cibo, ad esempio, non è prezioso per il suo contenuto in massa (abbiamo carbonio e azoto ovunque), ma per il contenuto di energia libera ordinata (zuccheri, grassi) che possiamo ossidare aumentando l’entropia dell’ambiente e sostenendo l’ordine del nostro corpo. Boltzmann tradusse la “lotta per la vita” darwiniana in termini termodinamici: **sopravvive chi riesce meglio a dissipare energia mantenendo la propria organizzazione**.

Va chiarito che **l’entropia stessa non può essere negativa** (è sempre una quantità  $\geq 0$  in termini assoluti). L’espressione *“entropia negativa”* o *“negentropia”* indica piuttosto *una diminuzione di entropia* in un sistema locale, compensata da un aumento altrove. In ambienti non isolati, dunque, è possibile creare **isole di bassa entropia** a spese di un più rapido incremento di entropia attorno. Ilya *Prigogine*, negli anni ’60, sviluppò il concetto di **strutture dissipative**: sistemi lontani dall’equilibrio che, attraversati da flussi di energia/materia, spontaneamente formano strutture ordinate (come celle di convezione, vortici, pattern chimici) che **dissipano** efficacemente l’energia in eccesso. La vita è vista come la più raffinata delle strutture dissipative: un vortice di materia organizzata che può persistere solo finché scorre energia attraverso di esso. Quando il flusso si interrompe (mancanza di nutrimento, morte), l’organizzazione collassa rapidamente verso stati disordinati – il classico *“polvere ritornerai”* non è che la Seconda Legge in azione.

### **Auto-organizzazione e origine della vita: il contributo di Eigen**

Come possono però nascere queste *isole di ordine*? L’**origine della vita** rimane uno dei punti più affascinanti e dibattuti. Qui interviene la **teoria dell’auto-organizzazione**. Il biofisico *Manfred Eigen* (Premio Nobel 1967) fu tra i pionieri nel proporre meccanismi per cui la chimica prebiotica, sfruttando principi fisici, potesse **auto-organizzarsi in sistemi replicativi**. *Eigen* introdusse il concetto di **iper ciclo (hypercycle)**: un modello teorico in cui diverse molecole autoreplicanti si collegano in un ciclo autocatalitico reciproco, ognuna facilitando la replicazione della successiva, con l’ultima che promuove la prima [7]. Questo ciclo chiuso crea una cooperazione: invece di competere distruttivamente, i replicatori formano un super-sistema integrato che può evolvere come un’unità. L’iper ciclo fu proposto come soluzione al problema dell’**error threshold**: sequenze genetiche troppo corte portano poca informazione, troppo lunghe tendono a mutare in modo catastrofico. Una rete cooperativa di replicatori più brevi poteva condividere informazioni e stabilità, aprendo la strada a genomi più complessi.

In termini entropici, l’iper ciclo è un esempio di come un sistema chimico, alimentato da energia (ad es. reazioni esotermiche o radiazione UV), possa **transitare spontaneamente verso strutture ordinate e funzionali**. È una **auto-organizzazione guidata dalla selezione naturale chimica**: i cicli autocatalitici più efficienti nel trasformare risorse in proprie copie prevarranno. Questo è un primo abbozzo di **Darwinismo molecolare**, che *Eigen* e colleghi svilupparono: l’evoluzione non aspetta l’organismo completo, comincia già a livello di molecole autoreplicanti.

Altri scienziati hanno sottolineato che l’auto-organizzazione in sistemi lontani dall’equilibrio può portare all’emergenza di *protocellule*. Stuart Kauffman parlò di **“ordine per autocatalisi”**: in un brodo primordiale abbastanza ricco, certe reazioni auto-catalitiche formeranno reti chiuse che si auto-sostengono,

precorrendo il metabolismo. Queste idee integrano termodinamica e biologia: l'aumento locale di ordine (molecole ordinate in cicli o compartimenti) è pagato dal **dissipare energia** (ad es. rompere legami energetici nei reagenti, o usare un gradiente chimico).

Un ulteriore sviluppo moderno è la proposta di Jeremy England, fisico del MIT, secondo cui l'emergere della vita non fu affatto un colpo di fortuna contro le leggi fisiche, ma al contrario *una conseguenza naturale di esse*. England ha elaborato una teoria in cui sistemi di molte particelle, soggetti a un drive energetico esterno (come radiazione o gradiente chimico) e a contatto con un termostato (ambiente che assorbe calore), **tendono a evolvere verso stati che dissipano sempre più efficacemente l'energia** [1]. In pratica, dato un flusso di energia che attraversa la materia, le configurazioni che assorbono e ridispongono (dissipano) meglio quell'energia saranno statisticamente favorite col tempo.

England riassume così: *“possiamo mostrare che gli esiti evolutivi più probabili sono quelli che hanno assorbito e dissipato più energia dai drive esterni dell'ambiente”*.

Ciò ha una sua logica intuitiva: un sistema di atomi che “risuona” meglio con le sollecitazioni esterne (per esempio assorbendo luce di una certa frequenza grazie a una struttura particolare) dissiperà più calore, e quindi quell'assetto sarà visitato più spesso nel corso delle fluttuazioni rispetto ad assetti meno efficienti nel dissipare.

Questa visione porta a un principio di **“adattamento dissipativo”** della materia inanimata. Una conseguenza sorprendente è che la **auto-replicazione**, cioè la capacità di fare copie di sé (cardine dei sistemi viventi), emergerebbe anch'essa come meccanismo per dissipare più energia: *“un modo eccellente di dissipare più energia è fare più copie di te stesso”*, osserva provocatoriamente England. Infatti, se una struttura dissipativa produce copie, il numero totale di dissipatori aumenta e si cattura ancora più energia dall'ambiente. England ha calcolato persino un limite termodinamico inferiore al costo energetico della replicazione di biomolecole (come l'RNA) e ha trovato che gli organismi reali operano non lontano da quel limite, segno di un'elevata efficienza evolutiva nel dissipare il minimo indispensabile. In breve, la sua teoria suggerisce che **l'origine e l'evoluzione della vita** non vadano viste come improbabili eccezioni alla tendenza entropica, ma come manifestazioni di essa: *la vita è ciò che fa l'universo quando c'è un flusso di energia costante attraverso un sistema*.

Queste idee non sono ancora universalmente accettate in biologia, ma offrono un ponte interessante tra fisica e biologia: **l'evoluzione potrebbe essere interpretata anche come un processo fisico di ottimizzazione della dissipazione**. Non a caso, sono stati osservati esempi di auto-replicazione anche in sistemi non viventi – ad esempio certi vortici nei fluidi turbolenti possono duplicarsi estraendo energia dal flusso circostante [1]. La natura sembra trovare modi di creare strutture quando c'è energia da dissipare.

### **Evoluzione: complessità crescente come risposta al flusso entropico**

La **teoria darwiniana dell'evoluzione** fornisce il quadro per capire come, una volta originatasi, la vita possa generare strutture via via più complesse senza violare le leggi fisiche. L'evoluzione per **selezione naturale** è spesso descritta come un *processo cieco ma creativo*: attraverso variazioni casuali e selezione non casuale dei più adatti, consente l'accumulo graduale di ordine e complessità funzionale. *Dawkins* paragona la selezione naturale a un “orologiaio cieco” capace di costruire design complessi senza un progetto predefinito. Importante, però, è riconoscere che questa costruzione avviene *a spese di energia*: l'aumento di ordine informativo nei genomi e nelle forme di vita è pagato dall'energia consumata dagli organismi e dal pianeta nel suo insieme. **Nessun organismo evolverebbe complessità in assenza di un flusso energetico**. *Dawkins* sottolinea infatti che non c'è contraddizione tra evoluzione e Seconda Legge: la Terra non è un

sistema chiuso, e l'energia del Sole alimenta il "motore" dell'evoluzione. Egli usa una metafora efficace: *"La selezione naturale, la sopravvivenza non casuale dei geni di successo, può essere vista come il bibliotecario della vita. E l'energia che la alimenta viene in ultima analisi dal Sole. La tendenza generale del fiume termodinamico resta in discesa. Ma una piccola parte dell'energia solare è intercettata dalle piante e usata per alimentare un rivolo in direzione opposta. Questo rivolo all'indietro lo si trova non solo nell'evoluzione, ma nella fisiologia di ogni organismo, e in molte reazioni chimiche. È come una pompa idraulica che sfrutta l'energia di un fiume che scende per pompare una piccola quantità d'acqua verso l'alto"* [2]. In altri termini, la vita e l'evoluzione rappresentano un piccolo **flusso locale di ordine crescente** (acqua pompata in salita) all'interno di un contesto universale in cui l'entropia globale cresce (fiume che scende a valle). Non c'è alcun conflitto: il "trucco" è che la **diminuzione locale di entropia** (crescita di complessità biologica) è alimentata da un flusso termodinamico (assorbimento e consumo di energia a bassa entropia) che produce dissipazione ed entropia ancora maggiore. Il Sole dissipa energia (emettendo fotoni ad alta energia) e la Terra la guadagna (riemettendo più fotoni a minore energia); la differenza sostiene la vita.

Durante l'evoluzione, si possono vedere **strutture complesse** emergere come *soluzioni efficienti per gestire energia e informazione*: il **genoma** è un archivio di informazione che consente a un organismo di svilupparsi e mantenersi; un **cervello** è un organo che elabora informazione per prendere decisioni utili alla sopravvivenza; perfino la **cultura** umana può essere intesa come un livello ulteriore, dove l'informazione viene condivisa e conservata extra-somaticamente (in libri, tradizioni, reti digitali) per migliorare ancora di più la capacità della specie di ottenere e usare risorse. Da un punto di vista entropico, ognuno di questi livelli rappresenta un **incremento dell'ordine ed efficienza locale**: ad esempio, un predatore con un cervello sviluppato può cacciare in modo più efficiente, convertendo energia chimica in movimento e calore con maggior successo rispetto a un organismo più semplice, quindi "dissipando" l'energia del suo ambiente in modo più efficace e prolifico. Allo stesso modo, una società tecnologica umana è capace di incanalare enormi flussi energetici (pensiamo all'agricoltura, ai combustibili fossili, all'energia nucleare) per sostenere una complessa organizzazione sociale e una sempre maggiore produzione di informazione (dalle arti alla scienza). **L'ordine complesso evolve perché è un mezzo efficace per scaricare i gradienti di energia**: dove c'è un gradiente (una differenza di energia, come cibo disponibile, luce solare, minerali concentrati), l'evoluzione tenderà a sfruttarlo attraverso organismi e comportamenti adattativi, finché il gradiente non sarà esaurito.

È interessante notare che l'evoluzione biologica sembra aver *esplorato diverse strategie* per aumentare la capacità di un sistema vivente di gestire entropia e informazione:

- **Metabolismo efficiente:** Batteri e archei hanno evoluto vie metaboliche che sfruttano praticamente ogni gradiente chimico o energetico disponibile (ossigeno, zolfo, metano, luce, ecc.), massimizzando la dissipazione possibile in nicchie diverse.
- **Maggiore stoccaggio di informazione genetica:** Dal genoma degli organismi unicellulari a quello dei complessi eucarioti, la quantità di informazione (numero di geni) è aumentata, permettendo regolazioni e adattamenti più sofisticati. Questo è stato possibile grazie a meccanismi come la ricombinazione sessuale, che rimescola l'informazione e accelera l'innovazione evolutiva.
- **Specializzazione cellulare e organismi multicellulari:** Organismi multicellulari hanno cellule differenziate che cooperano, aumentando l'ordine interno dell'organismo. Una cellula da sola ha capacità limitate; un insieme organizzato di cellule (tessuti, organi) può sfruttare risorse in modo coordinato ed efficiente (ad esempio, pensiamo a sistemi digestivi complessi, sistemi nervosi, apparati circolatori per trasporto efficiente di energia e materiali)

- **Sistemi nervosi e cervelli:** L'evoluzione di reti neurali ha permesso di elaborare informazione sensoriale e reagire prontamente all'ambiente. Un cervello consuma molta energia (il nostro cervello umano ~20% del metabolismo basale), ma fornisce all'organismo un vantaggio nell'anticipare e manipolare l'ambiente, migliorando le sue possibilità di sopravvivenza e riproduzione. In chiave entropica, il cervello *accelera* la dissipazione: ad esempio, escogitando strategie di caccia o adattando il comportamento, un animale può accedere a risorse che altrimenti resterebbero inutilizzate.
- **Cultura e tecnologia:** Nell'uomo, la trasmissione culturale (idee, tecniche) ha scatenato un ulteriore salto. La cultura si configura come un **metasistema evolutivo** – talvolta indicato come **evoluzione memetica o culturale** – in cui le informazioni (i cosiddetti **memi**, termine introdotto da *Dawkins* in *Il gene egoista* [The Selfish Gene, 1976]) vengono selezionate e accumulate indipendentemente dai geni. Tale dinamica ha favorito una rapidissima crescita di complessità: oggi, gli esseri umani organizzano città, reti di comunicazione globale ed economie industriali – strutture che incrementano l'ordine locale (dalle strade asfaltate agli edifici, passando per l'ordinamento dei materiali) grazie a un intensivo consumo di energia. In realtà, si potrebbe affermare che il fine ultimo (pur non essendo intenzionale) della tecnologia umana è quello di dissipare energia su scala sempre maggiore, passando dal carbone all'uranio fino alle future reazioni di fusione. In una prospettiva cosmica, l'umanità emerge come un agente dissipativo notevole, capace di trasformare rapidamente le risorse concentrate della Terra in calore disperso – un processo entropico che, però, localmente sostiene la nostra civiltà.  
Questa efficienza, per quanto impressionante, rischia altresì di compromettere (in gran parte l'ha già fatto) la stabilità delle risorse e degli ecosistemi terrestri, potenzialmente innescando un aumento eccessivo dell'entropia in sistemi chiusi e in sottosistemi fondamentali per la vita, se non gestiti con saggezza.

### Entropia, informazione e “negentropia”: il ruolo dell'informazione nei sistemi viventi

Un elemento chiave che distingue gli esseri viventi dai sistemi inanimati semplici è la presenza di **informazione codificata**: il DNA è un codice, le proteine hanno forme specifiche che realizzano funzioni, il cervello immagazzina ricordi e pattern. È naturale chiedersi come si collega l'**informazione** all'entropia. In fisica e teoria dell'informazione vale in generale un principio: *l'informazione è correlata all'ordine*, e molti autori hanno identificato **informazione** con **entropia negativa**. Il matematico *Leon Brillouin* ad esempio utilizzò il termine “negentropy” proprio per quantificare l'informazione guadagnata da una misura: più informazione hai su un sistema, più sei in grado di individuare il suo stato improbabile tra molti possibili (quindi stai diminuendo la tua incertezza, ovvero l'entropia della tua descrizione).

*Manfred Eigen* riassunse la questione dicendo: “*l'entropia si riferisce a una media di stati fisici, l'informazione si riferisce a uno stato fisico particolare*” [5]. In altre parole, l'entropia riguarda quanti microstati possibili sono compatibili con i vincoli macro (quindi una media statistica), mentre l'informazione riguarda *quale microstato specifico* tra quelli possibili si è realizzato. Un cristallo altamente ordinato ha bassa entropia perché pochi microstati gli corrispondono; se io so esattamente la posizione di ogni atomo del cristallo, possiedo molta informazione su di esso. *Eigen* nota anche che “*in un sistema fisico, l'informazione è l'opposto dell'entropia*”, in quanto l'informazione implica **configurazioni inusuali e altamente correlate**. Ad esempio, la sequenza di basi del DNA in un genoma non è casuale (caos massimo) né completamente regolare (ripetizione senza senso): è una sequenza *complessa, aperiodica ma con correlazioni*, che codifica istruzioni funzionali – quello che Schrödinger chiamò un “**cristallo aperiodico**”

portatore di informazione genetica. Tali strutture ricche di informazione corrispondono a stati di entropia molto più bassa rispetto a una poltiglia caotica di molecole equivalenti.

La **biologia evolutiva** può essere vista come la scienza di come l'informazione aumenta nei sistemi viventi nel tempo (tramite mutazione, selezione e memoria genetica). *Dawkins* ha parlato del *gene* come unità d'informazione che si propaga attraverso le generazioni (il gene egoista) e della *evoluzione culturale* attraverso i *memi* (unità di informazione culturale). L'informazione genetica è un tipo di “*negentropia*” *biologica*: per scrivere un genoma di 3 miliardi di basi come quello umano occorre selezionare una specifica sequenza tra le astronomiche possibili – ciò rappresenta un gigantesco guadagno di informazione rispetto al caos molecolare, reso possibile dal lavoro di selezione naturale attraverso il tempo. Analogamente, ogni volta che il nostro cervello apprende qualcosa di nuovo, si formano connessioni sinaptiche specifiche: si *riduce l'entropia* nel cervello perché tra le tante configurazioni possibili di circuiti neuronali ne viene impressa una particolare che codifica l'informazione (memoria). Questo “scrivere informazione” nel cervello richiede energia (sintesi proteica, impulsi nervosi), il che è coerente con il principio che “*non esiste pasto gratis*” neanche nell'informazione: per acquisire informazione utile bisogna esportare entropia altrove (il cervello consuma glucosio e ossigeno e rilascia calore).

Oggi si riconosce anche formalmente che **informazione ed entropia sono legate nella fisica**: il principio di *Landauer* (1961) afferma che **cancellare un bit di informazione ha un costo energetico minimo** ( $k_B T \ln 2$ ) dissipato in calore (aumento entropia totale). Questo fu una raffinata conferma che quando manipoliamo informazione in senso computazionale, stiamo necessariamente coinvolgendo entropia e termodinamica. Visto che qualsiasi “supporto” biologico o informatico, che codifica informazione, non ha capacità infinita, a un certo punto l'informazione obsoleta dovrà essere cancellata. Dunque un sistema vivente, che incessantemente acquisisce, elabora, utilizza informazione (dal DNA alle percezioni sensoriali), è anche un sistema che dissipa energia termica (aumento entropia totale) in accordo a queste operazioni.

**Entropia negativa e informazione** forniscono una prospettiva per capire la vita: *la vita è informazione accumulata contro il degrado entropico*. *Schrödinger* lo disse poeticamente come “life feeds on negentropy”; oggi potremmo dire “la vita è organizzazione che mantiene sé stessa attraverso informazione e flussi di energia”. Importante è evitare fraintendimenti vitalistici: non c'è bisogno di alcuna “forza vitale” misteriosa. La vita può essere compresa, almeno nei principi generali, come un **processo fisico-chimico guidato dalla termodinamica**: è un *disequilibrio stabile*, una forma di materia ordinata mantenuta aperta grazie a scambi di energia e informazione col contesto.

### **Cervello, mente e identità: l'entropia nella coscienza e la costruzione del sé**

Un singolo organismo vivente già sfida l'intuizione con la sua complessità organizzata. Ma il culmine di questa complessità, finora conosciuto, è la **mente umana cosciente**. Qui entriamo nella filosofia della mente e nelle neuroscienze: come fa un ammasso di atomi nel cervello a produrre l'esperienza soggettiva, la consapevolezza di sé, l'identità personale? E come si inserisce questo nel quadro entropico?

Neuroscienziati e filosofi come *Antonio Damasio*, *Daniel Dennett*, *Joseph LeDoux* e *Michael Gazzaniga* hanno esplorato l'emergere della coscienza e del sé come frutto di processi biologici ed evolutivi. Una chiave di lettura comune è che **la mente è un prodotto dell'organizzazione cerebrale complessa**, sviluppatasi perché aveva valore adattativo. *Damasio* in particolare enfatizza il ruolo dell'**omeostasi**: la regolazione dei parametri vitali interni. Egli propone che la coscienza sia emersa come estensione di meccanismi di regolazione vitale; i *sentimenti* primordiali di benessere/malessere rifletterebero lo stato omeostatico e costituirebbero il nucleo dell'esperienza cosciente [8]. In altri termini, secondo Damasio la coscienza si

sarebbe evoluta perché aiutava l'organismo a *mantenersi in vita*, fornendo una rappresentazione interna (un *senso di sé*) che integra le informazioni sull'interno del corpo con quelle sull'esterno, guidando decisioni in modo flessibile. Questo concetto lega strettamente la mente al fenomeno entropico della vita: **la coscienza sarebbe uno strumento sofisticato al servizio dell'omeostasi**, cioè della lotta locale contro l'entropia. Se un organismo può sentirsi affamato, assetato, impaurito, ed avere un senso di sé nel mondo, può agire in modo più efficace per trovare cibo, acqua, sicurezza, ecc. – tutte azioni che servono a conservare l'ordine interno e dunque a rinviare l'aumento di entropia che coincide con la morte.

*Joseph LeDoux*, noto per i suoi studi sulle basi neurali delle emozioni e autore di *Synaptic Self*, sostiene anch'egli che **l'identità personale risiede nelle connessioni sinaptiche del cervello**. Ogni esperienza modifica leggermente le sinapsi (le giunzioni tra neuroni); col tempo, il pattern unico di sinapsi rafforzate o indebolite è la memoria di chi siamo [9]. In quest'ottica, il *sé* non è un'entità fissa, ma un **processo in divenire** plasmato dall'informazione accumulata (le esperienze) nel cervello. Dal punto di vista entropico, potremmo dire che il cervello costantemente **assorbe informazione dall'ambiente (input sensoriali, interazioni)** e la immagazzina riducendo la propria entropia (forma strutture sinaptiche sempre più particolari). Questa riduzione interna di entropia è bilanciata dall'alto costo metabolico del cervello e dal calore dissipato. Ma biologicamente paga: un cervello che codifica molto dell'ambiente permette predizioni e comportamenti vantaggiosi.

*Daniel Dennett*, filosofo della mente, ha spinto l'idea che il *sé* sia una sorta di **“finzione utile” creata dal cervello**, definendolo *“un centro di gravità narrativa”* [10]. Egli argomenta che il nostro cervello costruisce una narrazione coerente a partire dalle molte sottocomponenti (percezioni, ricordi, desideri) e postula l'esistenza di un *“io”* unificatore perché ciò aiuta a dare senso e coerenza all'esperienza. In realtà, dice Dennett, quello che chiamiamo *io* è il prodotto di molte parti del cervello in dialogo, non un piccolo omuncolo nel cervello. *“Il sé è un centro di gravità narrativa: una finzione postulata per dare unità e significato a ciò che altrimenti rimarrebbe solo una collezione straordinariamente complessa di azioni, enunciati, impulsi, lamentele, promesse e così via – ciò che costituisce una persona”* [11]. Questa visione si sposa bene con l'idea che **l'identità sia un processo dinamico**, non una sostanza immutabile. Dal punto di vista fisico, i nostri atomi vengono continuamente ricambiati (si stima che in pochi anni quasi tutte le cellule del corpo – a eccezione di alcune neurali – siano rimpiazzate); ciò che persiste non è la materia, ma **l'informazione organizzata** – la forma, il pattern. L'identità personale è dunque simile a un **vortice in un fiume**: la forma e il movimento persistono anche se l'acqua che la compone cambia continuamente. Il vortice per esistere deve continuare a dissipare energia (la corrente del fiume); analogamente, l'io esiste finché il cervello vivo mantiene attivi i suoi circuiti e continua a scambiare energia e informazione col mondo.

**Nota:** Questa persistenza della forma può essere interpretata, nei termini dei sistemi complessi, come un esempio di attrattore dinamico: uno stato o insieme di stati verso cui tende spontaneamente l'evoluzione del sistema, anche dopo perturbazioni. In questo senso, l'identità può essere vista come un attrattore stabile del nostro sistema biologico-cognitivo.

Le ricerche di *Michael Gazzaniga* con pazienti *split-brain* (con gli emisferi cerebrali separati) hanno mostrato un fenomeno interessante: l'emisfero sinistro tende a inventare spiegazioni e narrazioni per conciliare azioni di cui non ha consapevolezza (per via della separazione dal destro). Gazzaniga ha chiamato questa funzione l’**“interprete”** del cervello sinistro. L'interprete costruisce una storia unificata della persona: *“è la colla che tiene unificata la nostra storia e crea la sensazione di essere un agente coerente e razionale”*, elaborando



teorie e generando spiegazioni su ciò che facciamo e perché, e queste narrazioni “*diventano la nostra autobiografia*” [12]. In pratica il cervello è un organo narrativo: genera ordine (una storia di sé) dal caos delle molte attività neuronali. Ciò ricorda ancora una volta il principio di base: **creare ordine richiede energia**. Il cervello, per funzionare e darci una mente coesa, consuma circa **20 watt in continuazione**, dissipando calore e assorbendo entropia negativa (ossia energia libera). Se la fornitura di energia cessa, la coerenza mentale (e l'ordine biologico sottostante) si disgregano.

Possiamo dire che **la mente è un modo in cui l'universo – attraverso la vita – ha trovato per organizzare informazione in modo autoreferenziale**. Menti come la nostra non solo dissipano energia per mantenersi, ma riescono a *riflettere* sul loro proprio posto nell'entropia: un cervello umano può formulare il concetto di Seconda Legge e capire il proprio destino termodinamico, un fatto affascinante di autoriferimento.

### La freccia del tempo e la prospettiva della fisica moderna

La **freccia del tempo**, come già accennato, è profondamente legata all'entropia. *Carlo Rovelli*, ne *L'ordine del tempo*, discute come le leggi fondamentali della fisica (meccanica quantistica, relatività generale) siano simmetriche rispetto al tempo – ovvero non distinguono passato e futuro – e che l'**unica differenza temporale fondamentale entri dalla termodinamica**, dall'entropia crescente. Il passato è semplicemente lo stato di minore entropia da cui proviene il presente. La moderna cosmologia affronta ancora il perché il Big Bang originasse in uno stato di entropia così bassa da permettere l'universo strutturato che vediamo (stelle, galassie, pianeti e vita). *Rovelli* ipotizza persino che la percezione del tempo potrebbe essere in parte un prodotto della nostra *mente che registra tracce (informazioni) irreversibili*, per cui l'entropia crescente del cervello nell'atto di formare ricordi dà l'illusione del flusso temporale. Qualsiasi essere vivente, essendo una struttura entropica, “sente” il tempo nella direzione in cui aumentano sia l'entropia ambientale sia le memorie accumulate.

Arthur Eddington sottolineava l'assolutezza della Seconda Legge: *Se qualcuno ti fa notare che la tua teoria preferita dell'universo è in disaccordo con le equazioni di Maxwell, tanto peggio per le equazioni di Maxwell. Se essa dovesse risultare in contraddizione con l'osservazione – beh, questi sperimentatori a volte combinano pasticci. Ma se la tua teoria venisse trovata in contrasto con la seconda legge della termodinamica, non posso darti alcuna speranza; non le resta che collassare in una profonda umiliazione.* [*The Nature of the Physical World* (1928) ch. 14]

L'irreversibilità è ineluttabile, le uova che si rompono ma non si ricompongono, i vasi rotti non tornano come nuovi. La nostra capacità di invertire localmente l'entropia (come in un frigorifero che raffredda) richiede comunque un aumento di entropia altrove (il motore del frigo che emette calore). Insomma, la **fisica moderna conferma pienamente che la vita è un fenomeno di non-equilibrio**: per restare in esistenza, deve essere continuamente alimentata da differenze di potenziale (gradienti) e produce entropia.

Un'interessante connessione moderna è quella tra entropia e **informazione quantistica**. *Rovelli* e altri fisici (come Wheeler col suo “it from bit”) evidenziano che l'informazione potrebbe essere un concetto fondamentale tanto quanto l'energia. In meccanica quantistica, l'osservazione (che fornisce informazione) influisce sul sistema; nell'analisi dei buchi neri, si parla di entropia del buco nero proporzionale alla sua area (Bekenstein-Hawking) e c'è il famoso **paradosso dell'informazione nei buchi neri**. Queste frontiere ci ricordano che entropia e informazione sono al cuore di come comprendiamo l'universo, dal microscopico al cosmico.

Inoltre, alcuni fisici e matematici hanno esplorato principi variazionali tipo “**massima produzione di entropia**” o “**massima economia di energia libera**” come possibili leggi statistiche per sistemi lontani dall’equilibrio. Anche se non esiste un principio generale accettato di massimizzazione dell’entropia per sistemi aperti, queste idee risuonano con il concetto che la vita *potrebbe essere* ciò che massimizza la dissipazione data una fonte energetica (un sole) e un dissipatore (lo spazio freddo). Ad esempio, Eric Schneider e Dorion Sagan nel libro “*Into the Cool*” sostengono proprio che i sistemi viventi evolvono in modi che aumentano il flusso entropico totale.

### **Implicazioni filosofiche: identità umana e posto nell’universo**

Considerare la vita come fenomeno entropico canalizzato ha profonde implicazioni filosofiche. **Chi siamo noi, se siamo in ultima analisi strutture dissipative temporanee?** Da una prospettiva, questo ridimensiona certe visioni dell’uomo: *non siamo estranei alle leggi dell’universo*, né poniamo una “sfida” al cosmo; siamo al contrario *figli delle leggi fisiche*, configurazioni particolari di atomi che, spinte da energie cosmiche, hanno acquisito complessità sufficiente da osservarsi e raccontarsi storie. Non c’è spazio per dualismi mente-materia miracolosi: la mente nasce dalla materia organizzata, l’identità non è un’anima immutabile ma un processo fisico-informazionale.

Questo può sembrare disorientante o riduttivo a chi pensa che tali spiegazioni “tolgano poesia” alla vita. Ma si può vedere anche al contrario: è **straordinario** che le semplici leggi della termodinamica e della chimica, tramite l’evoluzione, abbiano dato origine a Mozart, a Einstein, ai nostri amori e aspirazioni. Comprendere di essere “polvere di stelle” auto-organizzatasi, come diceva *Carl Sagan*, e che “*siamo un modo in cui l’universo conosce sé stesso*”, può indurre un sentimento di appartenenza al cosmo ancora più profondo. La nostra **identità umana** può essere riletta in chiave scientifica senza perdere valore: siamo *pattern* informazionali complessi, sostenuti da flussi di energia. La nostra **mortalità** appare come il destino naturale di ogni struttura dissipativa: quando non potremo più scambiare energia con l’ambiente, l’entropia ci dissolverà. Ma nel frattempo, nella nostra **finestra di improbabilità statistica**, possiamo generare bellezza, conoscenza, significato.

Alcuni filosofi della mente come *Daniel Dennett* abbracciano questa visione “naturalistica” e suggeriscono che, lungi dal togliere significato, essa ci responsabilizza: se l’io è un racconto, possiamo in parte *riscriverlo*; se la coscienza è un *processo*, possiamo studiarlo e migliorarne gli esiti (ad esempio educando noi stessi, comprendendo i bias del cervello, ecc.). *Gazzaniga* parla di una “mente sociale” e di come il nostro cervello interprete costruisca anche valori etici e idee di responsabilità – tutte cose reali nel loro livello descrittivo, anche se alla base fatte di neuroni. Insomma, **riconoscere le basi entropiche e informazionali della vita e della mente non ne annulla la ricchezza**, così come capire la chimica dei pigmenti non sminuisce un tramonto. Al contrario, fornisce una base più solida per apprezzare il miracolo naturale della complessità.

Dal punto di vista **cosmologico**, potremmo chiederci quale sia *il ruolo della vita nell’universo*. Se la maggior parte dell’universo tende a uno stato freddo, diluito e morto (come suggerito dal destino termodinamico dell’espansione cosmica), la vita è effimera? Forse, ma intanto è un **fenomeno locale di inversione temporanea dell’entropia** – un po’ come un ciclone in un’atmosfera: destinato a dissiparsi, ma finché c’è lascia una traccia. Alcuni, come Freeman Dyson, specularono su strategie di vita intelligente per evitare la “morte termica”, ma restano idee da fantascienza al momento. Per ora, possiamo osservare che l’universo conosciuto ha *già prodotto* in almeno un caso entità capaci di comprendere le sue leggi. In un certo senso, la vita e la mente **arricchiscono l’universo di nuovi livelli di complessità e significato**, anche se questi livelli sono soggettivi e temporanei.

Un esempio calzante è la **cultura umana**: dal punto di vista strettamente fisico, una biblioteca è un ammasso di molecole ordinate in modo altamente improbabile (bassa entropia). Eppure quell'ordine racchiude significato, storie, conoscenza – qualcosa di emergente che trascende la fisica pur essendo radicato in essa. Se un giorno l'umanità dovesse scomparire, l'entropia cancellerebbe lentamente quei libri (carte che marciscono, bit che si sparpagliano); ma finché esistiamo, abbiamo la responsabilità di custodire e accrescere questo ordine significativo. In questo senso, *il nostro posto nell'universo* può essere visto come **custodi locali dell'ordine** per un po' di tempo. Facciamo parte di un flusso: catturiamo l'energia solare, la usiamo per vivere, pensare, creare, e infine la restituiamo degradandola in calore. Nel farlo, però, *lasciamo un'impronta*: un pianeta che fiorisce di struttura, almeno finché il Sole lo permette e se impariamo a usare le risorse con saggezza.

## Conclusione

La vita come fenomeno che canalizza l'entropia è una potente chiave di lettura unificante. Dalla combustione di glucosio nelle nostre cellule alla sinfonia di sinapsi nel nostro cervello che forma un pensiero, tutto obbedisce alle stesse leggi fisiche. Abbiamo esplorato come la termodinamica statistica di *Boltzmann* spieghi l'improbabilità statistica della vita ma anche la sua possibilità, purché alimentata da energia. Abbiamo visto, con *Schrödinger* e *Prigogine*, che la vita mantiene il proprio ordine nutrendosi di entropia negativa dall'ambiente, fungendo da **isola locale di bassa entropia** in un mare di crescente disordine. Con *Eigen* e la teoria dell'auto-organizzazione, abbiamo intravisto come la chimica possa spontaneamente creare complessità replicativa, gettando le basi per l'evoluzione darwiniana. *Dawkins* e la biologia evolutiva ci hanno mostrato la grande "pompa entropica" dell'evoluzione: alimentata dal Sole, genera la diversità e la complessità del mondo vivente, dal genoma all'ecosistema, fino alla cultura. Abbiamo collegato l'entropia all'informazione, riconoscendo che DNA, neuroni e bit sono tutte forme di ordine improbabile che veicolano informazione contro il disordine dilagante. Infine, *Damasio*, *Dennett*, *LeDoux*, *Gazzaniga* ci hanno aiutato a vedere la coscienza e il sé non come misteri ultraterreni, ma come il culmine di questa scala di complessità: l'identità umana emerge da un organismo altamente organizzato che, ironicamente, è soggetto alle stesse leggi di decadimento di qualsiasi struttura materiale – e proprio questa tensione tra la fragilità fisica e la robustezza dell'informazione definisce la condizione umana.

In tutto ciò, la fisica moderna, con voci come *Rovelli*, ci ricorda l'immutabilità delle leggi fondamentali e la particolarità delle condizioni che rendono possibile l'ordine. Viviamo in un universo dove, per ragioni ancora da comprendere appieno, c'erano inizialmente sacche di bassa entropia che hanno permesso la formazione di galassie, stelle e pianeti – e almeno su un pianeta, la comparsa della vita. Questo ordine iniziale potrebbe essere stato il serbatoio che ha reso possibile tutto il resto. In futuro, l'entropia potrebbe vincere su tutta la linea, ma ogni momento organizzato strappato al caos è prezioso.

In definitiva, concepire la vita come canalizzazione dell'entropia ci dà una visione integrata: **siamo parte di un flusso termodinamico** che dalle stelle arriva a noi e attraverso di noi torna all'universo. Siamo **sistemi aperti**: prendiamo ordine, restituiamo caos, e intanto *esistiamo*. Comprendere questo ci rende, paradossalmente, ancora più speciali: siamo l'entropia fatta carne che contempla sé stessa. E forse, riconoscendo il nostro posto naturale, possiamo avere un maggiore senso di meraviglia e di responsabilità verso la sottile linea di ordine di cui siamo custodi temporanei nel vasto cosmico disordine.

**Sta alla nostra coscienza collettiva** il compito di evolvere verso stati improbabili di "ordine" a bassa entropia locale, senza generare, allo stesso, un aumento incontrollato dell'entropia nel sistema Terra.

Resta più di un legittimo dubbio sul fatto che ci stiamo davvero riuscendo.

***La risposta appartiene al nostro futuro.***

## Fonti online

- [1] [A New Physics Theory of Life | Quanta Magazine](#)
- [2] [Big mistake | Richard Dawkins | The Guardian](#)
- [3] [“L’ordine del tempo” di Carlo Rovelli \(2/6\) | by Michele Diodati | Spazio Tempo Luce Energia | Medium](#)
- [4] [https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:Zentralfriedhof\\_Vienna\\_-\\_Boltzmann.JPG#file](https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:Zentralfriedhof_Vienna_-_Boltzmann.JPG#file)
- [5] [Why information grows — César Hidalgo | by Atelier de Chile | Medium](#)
- [6] [Entropy and life - Wikipedia](#)
- [7] [Hypercycle \(chemistry\) - Wikipedia](#)
- [8] [Damasio's theory of consciousness - Wikipedia](#)
- [9] [Synaptic Self: How Our Brains Become Who We Are - PMC](#)
- [10] [The Self as a Center of Narrative Gravity](#)
- [11] [Il centro della gravità narrativa | Irresistibili](#)
- [12] [The Health Benefits of Autobiographical Writing: An Interdisciplinary Perspective - PMC](#)

## Bibliografia (letture di riferimento)

- Damasio Antonio - ***Sentire e conoscere, Storia delle menti coscienti*** - Adelphi Edizioni, 2022.
- Dennett Daniel – ***Coscienza, Che cosa è*** - Raffaello Cortina Editore, 2023.
- Dennett Daniel - ***L'idea pericolosa di Darwin*** - Bollati Boringhieri editore, 2004.
- Dawkins Richard - ***Il gene egoista*** - Arnoldo Mondadori Editore, 1976-1989.
- Eigen Manfred - ***Gradini verso la vita, L'evoluzione prebiotica alla luce della biologia molecolare*** - Adelphi Edizioni, 1992.
- Fabbro Franco - ***CHE COS'È la PSICHE, Filosofia e neuroscienze, Casa editrice Astrolabio*** - Ubaldini Editore, 2021.
- Gazzaniga Michael - ***La coscienza è un istinto, Il legame misterioso tra il cervello e la mente*** - Raffaello Cortina Editore, 2019.
- Ledoux Joseph - ***Lunga storia di noi stessi, Come il cervello è diventato cosciente*** - Raffaello Cortina Editore, 2020.
- Sen Paul - ***Il frigorifero di Einstein, Come la differenza tra caldo e freddo spiega l'universo*** - Bollati Boringhieri editore, 2021.
- Rovelli Carlo – ***L'ordine del tempo*** - Adelphi Edizioni, 2017.

## Autore e diffusione

Questo articolo è stato redatto da *Emanuel Borelli*, fondatore del progetto [primatesmia.ch](https://primatesmia.ch) e rappresentante della società [primates.mia.sagl](https://primatesmia.sagl), attiva nell’ambito dell’informazione, dell’intrattenimento e della divulgazione critica e scientifica.

La scrittura è il risultato di un lavoro originale di ricerca, sintesi e riflessione multidisciplinare, realizzato con il supporto di strumenti avanzati di scrittura assistita (incluso ChatGPT), utilizzati come estensione del pensiero, non in sostituzione.

Contenuti, fonti e scelte argomentative sono stati selezionati e verificati personalmente, in coerenza con i valori di indipendenza, rigore e apertura culturale che animano il progetto.

È possibile scaricare, condividere e citare liberamente questo documento per scopi educativi, divulgativi e non commerciali, a condizione che venga sempre indicata correttamente la fonte.

**Fonte consigliata per la citazione:**

“Figli della seconda legge”, Emanuel Borelli, [www.primatesmia.ch](http://www.primatesmia.ch)

---

**Licenza**

Questo articolo è distribuito con licenza **Creative Commons Attribuzione – Non commerciale 4.0 Internazionale (CC BY-NC 4.0)**.

Per maggiori informazioni sulla licenza:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>