

# Il supporto fisico dell'informazione

Incontro Interdisciplinare 19-12-2022

J. Julve

## Preambolo

Nel dibattito sulla natura dei diversi livelli della coscienza, dal dato sensibile (informazione acquisibile, registrabile, trasmissibile), alla sua elaborazione come conoscenza, alla coscienza della conoscenza e finalmente alla coscienza di sé o auto-coscienza, le correnti materialiste propongono il modello del cervello-computer che implementa un algoritmo cognitivo. Contrariamente, la posizione dualista riconosce una esistenza autonoma del mentale, che indubbiamente interagisce causalmente col suo supporto materiale per vie non algoritmiche che evidentemente esulano le possibilità descrittive delle leggi note della fisica.

John von Neumann (tra i fondatori della matematica della meccanica quantistica e dell'informatica) e Eugene Wigner (Nobel di Fisica, tra i creatori della MC) interpretarono il collasso della funzione d'onda proponendo che la coscienza dell'osservatore che esegue la misurazione ha un ruolo causale nel collasso della funzione. La nostra coscienza interferisce con la realtà! Al momento presente l'asserzione, già ripensata dallo stesso Wigner, è molto più smussata e viene situata nell'interfaccia tra lo stato quantistico puro e il mondo macroscopico, non essendo chiaro quale grado di coscienza (computer, animale o essere umano) sia sufficiente a causare il collasso. Il dibattito è aperto.

Nell'ipotesi materialista che ogni esperienza mentale, compresa l'auto-coscienza, sia associata ad una elaborazione di informazione ad un determinato livello, è importante chiedersi quali siano i limiti che realmente impongono le leggi note della fisica sul supporto materiale dell'informazione, a cominciare dal suo "quantum" elementare che chiamiamo bit. L'oggetto di questa nota è segnalare punti dove i principi accettati della fisica odierna, particolarmente ciò che riguarda l'energia e la sua conservazione, si aprano a possibilità non convenzionali. L'ipotesi di fondo è che, nell'accettazione della realtà non fisica del mentale, l'unicità dell'esistente debba far sì che le leggi della natura studiate dalla scienza non siano in contraddizione con l'esistenza di un mondo metafisico immateriale ma capace di azione causale efficiente.

## Informazione e trasformazione

Nel precedente Incontro, Parenti ha discusso gli aspetti filosofici del concetto di "trasformazione" e, rifacendosi ad Aristotele, sottolineava che «In un mondo dove tutto interagisce e quindi tutto ha una sua capacità propria di interagire (sia in senso attivo, sia in senso passivo) proprio per quello che è, chiamò en-ergheia (cioè "in azione": in latino fu tradotto actus) il termine dell'operazione e dynamis (potentia) la capacità». Tuttavia la scienza fisica galileiana circoscrive il termine "energia" a una accezione operativa, misurabile in unità convenute (eV, Joule, kWh,...), anche se può presentarsi in diverse forme: cinetica, potenziale, campi, ecc. tutte equivalenti a massa in omaggio a Einstein. Per la scienza, ogni trasformazione di qualcosa di fisico, cervello, neuroni e le loro attività compresi, dovrebbe coinvolgere un qualche cambiamento energetico, e ogni sistema deve avere una energia associata positiva, altrimenti è ... inesistente.

E' anche illuminante la chiarificazione di F. Faggin, che ha riportato G. Falciasecce<sup>1</sup>, sul significato oggettivo e soggettivo dell'informazione effettiva trasmessa da un "evento" tra un mittente e un ricevente, e come la teoria di Shannon si restringa a quella oggettiva e sia quindi valida anche per le

---

<sup>1</sup> Contributo di G. Falciasecce di novembre 2022.

macchine. Anche se (allargata al suo significato soggettivo) «l'informazione non è qualcosa di fisico che possiamo facilmente misurare, come per esempio la massa di un oggetto», Falciaeseca (sua nota 2) sottolinea che «nel processo di trasferimento della informazione ambedue i ruoli [mittente e ricevente] comportano una modifica perché si abbia davvero la trasmissione di qualcosa e un uso di energia. A livello macroscopico questo può apparire irrilevante ma non così scendendo via via di dimensioni fino al mondo microscopico.», e si chiede (nota 7) «quanta energia serve per garantire la riconoscibilità in presenza di disturbi», aspetto che riguarda ogni sistema o segnale fisico utilizzabile per registrare o trasmettere un bit elementare, indipendentemente da quanta informazione significativa contenga. In questo senso, persino il “rumore bianco”, per essere rumore, usa un minimo di energia. In altre parole, il pollice alzato dell'esempio di Falciaeseca, anche se carente di contenuto informativo per un ricevente non in attesa di vedere quel gesto, richiede una energia per essere alzato.

### Informazione e energia

Nella letteratura scientifica su questo argomento ho trovato un campo di studio a me nuovo, di cui è emblematico il “principio di von Neumann - Landauer” (in annesso ne riporto una voce di Wikipedia, che nel sito web fornisce una bibliografia). Se nel cancellare un bit di informazione c'è una dissipazione di energia non minore di un determinato limite secondo questo principio, ne consegue che per crearlo ce ne vorrà al meno questa quantità.

Tuttavia sarebbero esentati da questo limite (a quanto pare, ma ci sono dei critici) gli scambi di informazione coinvolti nella “computazione reversibile”. Nella mia lettura preliminare, si tratterebbe di elaborazione dell'informazione che non la crea né la distrugge, cioè il numero di bit in input è uguale a quello in output, il che evoca la logica formale le cui operazioni sui dati non aggiungono né tolgono contenuto di verità. Come corollario di un teorema di J. Nash del 1956, computazione quantistica e computazione reversibile sarebbero un sola cosa, il che mi pare corrisponda al fatto che l'evoluzione “unitaria” quantistica conserva l'informazione, diversamente dal collasso della funzione d'onda. In una serie di “Lectures on Computation” Feynman mostrò nel 2000 che non esiste un limite inferiore alla energia necessaria per eseguire le computazioni reversibili.

In questa cornice meccanicistica, inserita nel paradigma riduzionista della fisica, un dibattito su informazione e trasformazione del mittente e del ricevente, in particolare su ciò che riguarda i fenomeni del mentale, senza riferimento a un supporto fisico e coinvolgimento di una energia, sarebbe come minimo a-scientifico, mentre per il dualismo i fenomeni della coscienza non sono fisici, o al meno non riducibili alla materialità di un cervello-computer algoritmico. Nella convinzione che il mondo reale (l'esistente) includa il metafisico e non possano esserci ambiti sconnessi, ho cercato anfratti della fisica dove la compresenza di una energia, come sinonimo di esistenza di qualcosa di reale, e la legge della sua conservazione (sicuramente il dogma più universale) lascino spazio ad altre possibilità o, al contrario, ci siano solide ragioni teoriche nella forma di teoremi di impossibilità (detti di “no-go”) che lo impediscano.

### Positività e conservazione dell'energia?

Nella fisica classica si considerano energie potenziali negative<sup>2</sup>, ma solo come risultato di convenzioni pratiche. In meccanica quantistica, formalmente il principio d'indeterminazione tempo-

---

<sup>2</sup> Nel considerare energie potenziali, per esempio nei campi di forze centrali come il campo gravitazionale o un elettrone in un atomo, se si assegna convenzionalmente il valore zero al potenziale nell'infinito, gli stati legati hanno energia potenziale negativa. Essendo l'energia di ogni sistema limitata dal basso, se diamo invece valore zero alla energia minima del sistema, tutte le energie potenziali saranno positive. Adotteremo questa convenzione.

energia ammette violazioni nella conservazione dell'energia, ma inosservabili perché permesse solo durante brevissimo tempo, e comunque in media (valore d'aspettazione) l'energia si conserva. Nel posteriore contesto della Teoria Quantistica dei Campi (QFT) e nelle prime proposte di equazioni d'onda relativistiche (Klein-Gordon e Dirac) c'erano soluzioni di energia negativa in senso stretto, ma rapidamente reinterpretate come antiparticelle osservabili a energia positiva. Con forti restrizioni, ereditate dal principio d'indeterminazione quanto all'entità e alla durata, in QFT sono tuttavia possibili densità locali di energia negativa potenzialmente osservabili<sup>3</sup>. Per esempio nella evaporazione quantistica dei buchi neri (predetta da S. Hawking) viene assorbita energia negativa che fa diminuire la massa del buco.

Alla scala cosmologica l'energia oscura, associata alla costante cosmologica e comunemente considerata positiva (concettualmente poteva essere anche negativa), è invocata per spiegare l'accelerazione osservata dell'espansione dell'universo. Ne dovrebbe costituire addirittura il 70% del suo contenuto energetico, anche se estremamente diluito nello spazio con una massa equivalente stimata di circa quattro atomi di idrogeno al metro cubo. Si tratterebbe di una sconosciuta sostanza o "fluido cosmologico" senza correlato particellare noto, con una equazione di stato<sup>4</sup> che, per una densità di energia positiva, produce una pressione negativa e accelerazione della espansione. Il punto importante è che rappresenta creazione di massa-energia dal nulla in violazione del principio di conservazione della energia, anche se in misura estremamente piccola, e ripropone, in altri termini e con altre conseguenze osservabili, la vecchia e scartata idea di Hoyle di creazione continua di materia per avere un universo in espansione e dalla apparenza stazionaria.

Alternativamente a una equazione di stato esotica, altri esperti<sup>5</sup> preferiscono parlare direttamente di energia o massa negativa, anche se porta ad altri problemi. Se veramente esiste, positiva o negativa, si cercano attivamente interazioni con la materia ordinaria (particellare o radiazione) oltre l'effetto gravitazionale cosmologico per cui è stata introdotta (ipotesi "convenzionale"), debolissimo a scala locale. Gli scambi con le forme di energia positiva note osservabili in laboratorio darebbero a queste la possibilità della sua non-conservazione anche se in misura infima.

### Agenti causali materiali e immateriali

Nel paradigma vigente della QFT, alla radice costitutiva (in senso riduzionista) del mondo fisico noto, ci sono fenomeni di creazione e distruzione di particelle elementari nel rispetto della conservazione dell'energia. Un fotone di energia sufficientemente alta (raggio gamma) può creare una coppia  $e^+e^-$  oppure  $\mu^+\mu^-$  (o altre coppie particella-antiparticella) ma per dare luogo (causare?) a ognuna di queste possibilità ci vogliono due agenti: l'energia necessaria (al meno due volte la massa della particella in questione), fornita dal fotone, e l'azione del campo quantistico corrispondente. Della prima possiamo dire che è "fisica", ma il campo quantistico rientra nella categoria dell'informazione non materiale: la potenzialità di creare tale tipo di particella, anche se codificata in un operatore matematico e associata a una ampiezza di probabilità.

---

<sup>3</sup> L.H.Ford, *Negative Energy Densities in Quantum Field Theories*, arXiv:0911.3597v1 [quant-ph] 18Nov2009.

<sup>4</sup> In termodinamica la forma generale dell'equazione di stato per sostanze poco dense è  $p = \omega \rho$  ( $p$  pressione,  $\rho$  densità di massa-energia e  $\omega$  un parametro caratterizzante la sostanza, che nei gas ideali è proporzionale alla temperatura). Per ogni forma di materia-energia diluita conosciuta, come gas, polvere o radiazione,  $p$  e  $\omega$  sono positivi, mentre per la materia oscura rappresentata dalla costante cosmologica si ha  $\omega = -1$ . La conseguente pressione negativa è una lettura del fatto che questa densità di energia è costante e connaturata allo stesso spazio, una forma particolare di energia del vuoto, sicché se ne crea insieme allo spazio nella sua espansione. Il nesso tra pressione negativa e accelerazione dell'espansione è meno intuitivo e risulta dalle equazioni di Friedmann della Relatività Generale.

<sup>5</sup> J. S. Farnes, *A unifying theory of dark energy and dark matter: Negative masses and matter creation within a modified  $\Lambda$ CDM framework*, *Astronomy&Astrophysics*, 620, A92 (2018).

Nel decidere l'esito di un evento singolo (il collasso della funzione d'onda in una determinata autofunzione piuttosto che in un'altra, o saltare l'elettrone a un altro livello energetico dell'atomo tra quelli disponibili, o creare il fotone un dato tipo di particelle), è necessaria una energia determinata, ma anche una ulteriore informazione immateriale, accennata da von Neumann e Wigner, che la scienza canonica affida al caso quantistico soggetto a una probabilità statistica.

## Conclusioni

Già nella fisica esiste un tipo di informazione con effetti causali che ha una base immateriale: le funzioni d'onda e i campi quantistici, non osservabili direttamente in laboratorio (lo sono solo le probabilità degli eventi misurabili e le energie coinvolte), codificati come elementi di spazi matematici astratti e pensabili come appartenenti a un mondo metafisico platonico. Tuttavia la materializzazione delle potenzialità rappresentate in questi enti richiede una energia che è invece strettamente fisica nel senso di misurabile. Nell'insieme, in questi processi il confine tra cause materiali e immateriali non è tanto netto.

Sulla possibilità dell'azione causale di un mondo mentale immateriale sul materiale, al meno la computazione reversibile pare offrire la possibilità di manipolare l'informazione senza soglie di energia minima, e quindi per i processi cerebrali non escluderebbe neanche input dal mentale non associati a una energia. L'ipotetico "perceptronio" di Tegmark<sup>6</sup> coinvolgerebbe invece una energia. Infine la natura del vuoto nella teoria quantistica dei campi contempla l'esistenza di densità locali di energia negativa, mentre l'energia oscura cosmologica, se reale, per natura suppone a sua volta la non conservazione, con ricadute su quella ordinaria attraverso la possibile interazione con essa. Tuttavia, per bit di informazione con supporto a livello atomico o molecolare, a queste scale l'energia oscura sarebbe più piccola del limite di Landauer per molti ordini di grandezza.

In conclusione, la fisica nota non escluderebbe per ragioni di principio la possibilità dell'azione causale sul mondo materiale di un mondo metafisico immateriale al quale presumiamo appartenga la coscienza.

---

<sup>6</sup> Max Tegmark, *Consciousness as a State of Matter*, quant-ph > arXiv:1401.1219 (2015).  
Citati da R. Casadio nel contributo "Fenomeni quantomeccanici cerebrali", giugno 2022 :  
*l'Universo Matematico*, Bollati Boringhieri, 2014, e  
*Vita 3.0. Essere umani nell'era dell'intelligenza artificiale*, Raffaello Cortina Editore, 2017.

## Annesso

Il Principio di Landauer ([https://it.wikipedia.org/wiki/Principio\\_di\\_Landauer](https://it.wikipedia.org/wiki/Principio_di_Landauer))

Il **principio di Landauer**, formulato per la prima volta nel [1961](#) da [Rolf Landauer](#)<sup>[1]</sup> presso l'**IBM**, prevede che l'eliminazione di [bit](#) di informazione produca una quantità di calore che non possa essere diminuita oltre un determinato limite. Il principio di Landauer conferma quindi il [secondo principio della termodinamica](#) ed è stato dimostrato sperimentalmente.<sup>[2][3]</sup> Il campo di studi che si occupa di questi problemi è quello dell'[informazione quantistica](#) ed è uno dei più vitali nella fisica contemporanea; il paradosso del [diavoleto di Maxwell](#) è in gran parte ancora attuale.

Il principio di Landauer è stato enunciato come segue da Charles Bennett:<sup>[4]</sup>

Qualunque manipolazione dell'informazione *logicamente irreversibile*, come la cancellazione di un [bit](#) o la confluenza di due percorsi computazionali, deve essere accompagnata da un corrispondente *aumento dell'entropia* dei gradi di libertà non contenenti informazione dell'apparato che processa l'informazione o del suo ambiente.

In particolare, la cancellazione di un bit d'informazione è associata alla dissipazione di una quantità di lavoro data dalla seguente espressione, nota come il limite di Landauer:

$$W = kT \ln 2$$

dove:

- $k$  è la [costante di Boltzmann](#)
- $T$  è la temperatura assoluta del circuito in [kelvin](#)
- $\ln 2$  è il [logaritmo naturale](#) di 2, che vale circa 0,69315

A 25°C (temperatura ambiente o 298,15 kelvin), il limite di Landauer rappresenta un'energia approssimativamente pari a 0,0178 [elettronvolt](#). Teoricamente un computer operante a temperatura ambiente potrebbe commutare un miliardo di bit al secondo consumando solo 2,85 [picowatt](#).

Se non è cancellata nessuna informazione la computazione può essere [termodinamicamente reversibile](#) e non richiede alcun rilascio di calore. Tutto ciò ha portato allo sviluppo della [computazione reversibile](#). L'unico modo per superare questo limite secondo [Charles H. Bennett](#) è lo sviluppo di nuove tecnologie, come il [computer quantistico](#) o la [computazione reversibile](#).

[https://en.wikipedia.org/wiki/Reversible\\_computing](https://en.wikipedia.org/wiki/Reversible_computing)

<https://www.americanscientist.org/article/computers-that-can-run-backwards>