

Entropia ed informazione

Poche note raccolte da Joy Marino, dicembre 2012

Primo tempo: le macchine a vapore

Il 1800 è il secolo ossessionato dallo sfruttamento dell'energia, dalla trasformazione del calore in movimento. Gli scienziati sono arruolati a questo fine e cominciano a delimitare il perimetro di quello che è possibile fare, in via teorica, prima che qualche inventore da strapazzo cominci a raccontare frottole. Così Carnot definisce la macchina ideale che rappresenta il limite di efficienza con cui si può trasformare il calore in energia meccanica, e per primo parla di dissipazione di energia, perché qualsiasi macchina, per quanto efficiente, per quanto lenta, dissipa una parte dell'energia che converte in lavoro.

Rispetto all'universo di Newton, dove la meccanica "classica" si basa sul "nulla si crea, nulla si distrugge", tutto si trasforma, è veramente un punto di non-ritorno. Per la prima volta anche il tempo entra pesantemente in gioco: se le sfere newtoniane possono girare indifferenteemente avanti, o indietro come un film proiettato al contrario, adesso la freccia del tempo assume un significato inequivocabile: la dissipazione di energia è irreversibile, il passato è passato, il futuro è il futuro. Se nel passato c'era una stella che si accendeva ed emanava calore, nel futuro si sarà un nulla tiepido ed uniforme.

Le leggi della termodinamica vanno a coppie: la prima definisce quant'è la "energia interna" di un dato sistema, il massimo teorico che può essere trasformato in lavoro. La seconda afferma che all'interno di un sistema chiuso c'è una grandezza che aumenta sempre, qualunque trasformazione si applichi all'energia, e questo fa sì che l'energia interna vada scemando e nessun moto possa essere davvero perpetuo.

L'Entropia nasce come proprietà macroscopica dei sistemi termodinamici.

Secondo tempo: i nuovi atomisti

Come Epicuro e Lucrezio, scienziati come Maxwell, Gibbs e Boltzmann vogliono interpretare la realtà, e le leggi della fisica che la riassumono, in termini di "atomi" o "molecole", di particelle microscopiche che, viste nel loro insieme, determinano certe proprietà macroscopiche dei sistemi. È la Meccanica statistica che richiude il divario tra la termodinamica e la meccanica newtoniana: quello che a livello microscopico si comporta secondo le leggi della meccanica classica, con particelle che come palle da biliardo si muovono nello spazio conservando la quantità di moto ("nulla si crea, nulla si distrugge") ad ogni urto tra loro, a livello macroscopico corrisponde a proprietà come la pressione e la temperatura (di un gas). Gibbs e Boltzmann riscrivono l'equazione dell'entropia semplicemente in termine del disordine delle particelle elementari che compongono il sistema. L'irreversibilità della natura, rappresentata ad esempio dal ghiaccio che si scioglie nell'acqua, corrisponde al maggior disordine che il sistema finale ha rispetto ai due componenti iniziali: acqua ghiacciata (fredda) ed acqua calda. Ma la stessa formulazione dell'accresciuto disordine si applica che mescoliamo acqua colorata diversamente o se si apre un foro tra un contenitore pieno di gas ed uno vuoto.

Si parla in termini statistici, perché le particelle si muovono liberamente seguendo le leggi cardinali della meccanica classica, per cui non si può escludere che a partire da acqua tiepida non si riformi il cubetto di ghiaccio, o che i colori si separino: è solo che è altamente improbabile che questo accada. Quanto improbabile? Tanto quanta è la probabilità che un certo numero di particelle si trovi in una particolare configurazione (che ai nostri occhi è

“ordinata”, ma è solo una delle possibili) rispetto ai diversi modi in cui le particelle possono trovarsi. Il passo successivo è allora la combinazione delle leggi della statistica e della termodinamica: dato un sistema che può trovarsi in uno tra tanti possibili “microstati” diversi, la sua entropia, S sarà data da:

$$S = -k_B \sum_i P_i \ln P_i$$

dove P_i è la probabilità che il sistema si trovi nel i -esimo microstato, e k_B è la firma che Boltzmann ha voluto mettere al suo capolavoro. Ma alla base di tutto c'è il logaritmo, ed infatti la formula spiega come unendo due sistemi, l'entropia totale sia pari alla somma delle entropie.

Gli scienziati sono bravissimi ad immaginare l'impossibile ed ecco Maxwell proporre il suo esperimento teorico con il suo “diavoletto”: se è la meccanica statistica a determinare le proprietà macroscopiche di un sistema isolato, allora perché non immaginare un diavoletto che sta di guardia ad una valvola tra due serbatoi e, veloce come il fulmine, fa passare da un a parte all'altra solo le particelle che sono molto veloci (oppure solo quelle di un certo colore)? Alla fine dovremmo trovare che l'entropia è diminuita, e quindi che la Macchina del Moto Perpetuo è possibile. Basterebbe mettere ordine là dove c'è disordine!

Terzo tempo: la teoria dell'informazione

Shannon aveva ben altri problemi con cui scontrarsi. La codifica e trasmissione dell'informazione negli anni 40 non era più il club degli ingegneri elettronici, ma cominciava ad essere pane per i denti dei matematici. La natura discreta dell'informazione era il punto di partenza. Non era necessario chiamarlo “bit”, ma fin dai tempi di Teseo e delle sue vele nere il singolo elemento di informazione è discreto: “sì” oppure “no”, “ho vinto” oppure “ho perso”. Per Shannon il problema era misurare quanta “informazione” contiene un messaggio, e quindi, di conseguenza, quanto costa inviarlo, dato un sistema di trasmissione e le difficoltà che un canale di trasmissione disturbato da “rumore” può trovare.

La sua intuizione è equiparare il grado di ignoranza al disordine: il “messaggio” è quella quantità di informazione che fa passare il ricevente da uno stato di incertezza ad uno di ordine (o di minor incertezza). Quindi quantità di informazione è il negativo della quantità di incertezza intrinseca, qualcosa molto prossima al “disordine” della meccanica statistica. Dice John Von Neumann in una lettera a Claude Shannon:

"You should call it entropy, for two reasons. In the first place your uncertainty function has been used in statistical mechanics under that name, so it already has a name. In the second place, and more important, no one really knows what entropy really is, so in a debate you will always have the advantage."

La formula che sintetizza questo somiglia molto alla formulazione dell'entropia sopra riportata (e dovuta a Gibbs):

$$H = - \sum_i^n P(x_i) \log_b P(x_i)$$

dove H è la misura dell'incertezza di una variabile X che può assumere n valori $(x_1 \dots x_n)$, ognuno con probabilità $P(x_i)$.

Più tardi (1957) Jaynes ha proposto di vedere l'entropia termodinamica come un'applicazione della teoria dell'informazione di Shannon: si può pensare all'entropia termodinamica come la

quantità di ulteriore informazione necessaria per definire il particolare stato microscopico del sistema, che rimane non comunicato da una descrizione espressa solamente in termini delle variabili macroscopiche della termodinamica classica; tutto questo a meno di una costante di proporzionalità che è proprio la costante di Boltzmann.

Allora l'ipotesi di Maxwell può ridurre l'entropia termodinamica di un sistema utilizzando informazioni sullo stato delle singole molecole; ma per operare questo diavoleto deve aumentare l'entropia termodinamica del sistema come minimo di una quantità pari all'informazione che si propone di acquisire e memorizzare; perciò l'entropia termodinamica totale non decresce. Così si risolve il paradosso e tante grazie a Landauer (1961).

En passant, il Principio di Landauer che sta a monte ha implicazioni sulla quantità di calore che un calcolatore deve dissipare nell'elaborare una data quantità di informazione, fissando il limite teorico. Però i calcolatori moderni sono ben lontani dal limite di efficienza: con la prospettiva che i "sistemi di calcolo elettronico" dissipino qualcosa come il 5% dell'energia elettrica prodotta dall'uomo, forse prima o poi andremo a scontrarci con il limite teorico della quantità di informazione che possiamo manipolare sul nostro piccolo pianeta...

Quarto tempo: i buchi neri

Se la seconda legge della termodinamica è davvero universale, deve valere ovunque, anche in certi posti dalle condizioni climatiche un po' estreme come i buchi neri. Questi, previsti dalla relatività generale di Einstein, sono la forma più densa di materia, con una forza gravitazionale tanto intensa che nemmeno la luce può sfuggire, da cui appunto il nome: "buchi neri".

In effetti, tenendo conto dell'entropia i buchi neri sono un po' meno neri di quel che si pensava, come ha fatto vedere Stephen Hawking: se teniamo conto di effetti quantistici nei pressi della superficie del buco nero, dove anche il tempo rallenta fino a quasi fermarsi (*l'orizzonte degli eventi*), il buco nero emette una radiazione, termica a tutti gli effetti, e quindi di fatto "evapora" sia pur lentissimamente. Il risultato sorprendente calcolato da Hawking a partire da questa radiazione è che l'entropia del buco nero è uguale alla sua superficie misurata in "aree di Planck" (il quadrato della lunghezza di Planck, \hbar , una delle costanti universali di questo universo).

Area e non volume, questo è sorprendente. Si può dimostrare che ogni volta che un buco nero accresce la sua massa fagocitando una stella, oppure due buchi neri si uniscono, l'area sottesa dall'orizzonte degli eventi aumenta in proporzione all'incremento di entropia.

Ma se si riprende l'interpretazione dell'entropia come informazione, questo sorprendente risultato significa che tutta l'informazione che è contenuta dentro un sistema isolato sarà proporzionale alla superficie di un buco nero di uguale massa. Tutto va come se l'informazione necessaria per descrivere in ogni particolari quel sistema possa essere scritta su una superficie, in modo del tutto analogo alla fotografia olografica, in cui impressiono una pellicola piana con tutte le informazioni necessarie per riprodurre una scena in tre dimensioni. Ecco il Principio Olografico, secondo cui il mondo in tre dimensioni (quattro considerando lo "spaziotempo") sarebbe in realtà a due dimensioni, e le nostre sensazioni di vivere nello spazio una pura illusione.

Quinto tempo: la gravità come informazione

Fin qui si è parlato di "Leggi", di "Meccaniche", facendo riferimento ad un corpus di conoscenze e teorie che sono sostanzialmente condivise da tutti o che, quantomeno, non sono mai state falsificate.

Giunti ormai ai nostri giorni, dobbiamo parlare di teorie che sono solo proposte, congetture sull'Universo non ancora consolidate e che, forse già domani, potrebbero essere dimostrate inconsistenti. Ma si tratta comunque di teorie affascinanti.

Nel 2010 Erik Verlinde ha suggerito che la gravità sia semplicemente una manifestazione dell'entropia nell'Universo. Partendo dal Secondo Principio, le differenze di entropia tra diverse parti dell'Universo generano una forza che ridistribuisce la materia in modo tale da massimizzare l'entropia. Questa forza è quella che chiamiamo gravità.

Questo approccio spiega alcune cose che le teorie più convenzionali non risolvono (ad esempio la grandezza della cosiddetta "energia oscura"), ma ha anche alcune limitazioni che rendono i fisici dubbiosi. L'aspetto più intrigante è però l'idea che la gravità sia essenzialmente un fenomeno dell'informazione.

Un passo ulteriore è stato fatto da Jae-Weon Lee e dai suoi colleghi coreani. Ancora una volta il punto di partenza è l'effimera pelle dei buchi neri e quello che si può ipotizzare sui fenomeni che colà accadono.

Per il Principio di Landauer sopra ricordato, la cancellazione di un quanto di informazione provoca un aumento dell'entropia dell'Universo e richiede una specifica quantità di energia. Quando questa cancellazione avviene sull'orizzonte degli eventi di un buco nero, sostengono, è lo stesso *spaziotempo* che deve riorganizzarsi in modo da massimizzare l'entropia in corrispondenza della superficie del buco nero: ecco la forza di gravità.

Alcuni fisici sono convinti che le proprietà dell'informazione non provengano dal comportamento di vettori quali fotoni ed elettroni, ma che sia esattamente il contrario: è l'informazione stessa ad essere il sottofondo misterioso di cui è fatto l'Universo.