

LAVORO PRODUTTIVO E PRODUZIONE D'INFORMAZIONE

Renato Nobili - Dipartimento di Fisica dell'Università di Padova

INDICE

Parte I. La nozione energetista di lavoro

I.1. I diversi significati della nozione di lavoro	2
I.2. La nozione di lavoro nella fisica	2
I.3. La scoperta dell'energia	5
I.4. La scoperta dell'entropia	6
I.5. Il superamento dell'energetismo	7

Parte II. La nozione informazionalista di lavoro

II.1. La misura dell'informazione	9
II.2. Informazione e incertezza	11
II.3. Il costo termodinamico dell'informazione	12
II.4. Neg-entropia o informazione termodinamica	14
II.5. L'attività informazionale dell'operatore umano	15
II.6. Atto elementare di produzione e sua misura informazionale	16

Parte III. Lavoro produttivo e coscienza

III.1. Informazione pratica, informazione semantica e autocoscienza	18
III.2. La natura informazionale del pensiero	20
III.3. Complessità e tempo di apprendimento	21

Parte IV. Tecnologia e merceologia informatica

IV.1. I prodotti del lavoro dal punto di vista informazionale	24
IV.2. I mezzi di produzione dal punto di vista informazionale	26
IV.3. Il mercato dell'informazione	28
IV.4. Avvento e sopravvento del WEB-GEIST	29

Considerazioni conclusive	31
--	----

Bibliografia	32
---------------------------	----

I. LA NOZIONE ENERGETISTA DI LAVORO

I.1. I diversi significati della nozione di lavoro

Almeno fino alla metà del '900 il termine lavoro fu usato con almeno tre significati distinti ma non privi di relazioni reciproche: 1) nel senso fisico di trasferimento energetico che si attua mediante forze applicate a punti mobili; 2) nel senso economico-industriale di fattore della produzione; 3) nel senso antropologico di attività conforme a uno scopo.

Da un punto di vista strettamente scientifico si è data una misura di quantità di lavoro soltanto nel senso indicato al punto 1. In modo assai meno rigoroso si è ritenuto di poter assumere quale misura di lavoro, nel senso indicato nel punto 2, la misura del tempo di lavoro mediamente richiesto per lo svolgimento di una certa attività. Per quanto concerne la nozione di lavoro nel senso precisato nel punto 3, mi pare che nessuno abbia mai introdotto un criterio di misurabilità.

Si potrà tuttavia rilevare che un'attività produttiva, che richieda all'operatore umano soprattutto azioni muscolari, vale a dire, che si serva dell'essere umano essenzialmente come sorgente di forza motrice, verrebbe a comprendere le tre accezioni su elencate come tre diversi aspetti di uno stesso concetto di lavoro.

Che la forza motrice erogata da un essere umano durante un'attività che richiede in modo essenziale l'applicazione della forza muscolare sia un'attività conforme a uno scopo, appare evidente se si considera la differenza che passa tra l'applicazione della forza fisica a fini produttivi e la ginnastica da camera. Che sia anche misurabile in termini di tempo di lavoro è altrettanto evidente, dato che l'apparato muscolare umano è capace di fornire potenza motrice continuativa in ragione di circa 20 watt (circa 10 per una donna). È perciò chiaro che in condizioni di massimo rendimento continuo tempo di lavoro e quantità di lavoro sono legati tra loro da una semplice relazione di proporzionalità.

Purtroppo questa soluzione del problema è tanto semplice quanto inutile. Che il lavoro umano non si riduca a semplice lavoro muscolare è fin troppo evidente, dato che, specialmente oggi, l'uso dei muscoli come sorgenti di forza motrice ha un ruolo assai marginale in ogni attività produttiva. Questo si spiega molto bene se si considera che, secondo un calcolo effettuato verso la metà degli anni '50,⁽¹⁾ i costi delle forze motrici umana, animale ed elettrica stavano nei rapporti 480:30:1. Bisogna anche considerare che già negli anni '50 l'attività lavorativa umana si presentava prevalentemente come un'attività di controllo manuale di macchine e impianti, e che, in tempi più recenti, in seguito ai progressi dell'automazione e dell'informatica, il lavoro umano è diventato in larga misura un'attività di controllo numerico computerizzato di macchine e impianti.

Quest'ultima considerazione suggerisce che, in qualche senso da specificare, è più opportuno assumere quale misura delle quantità di lavoro la misura della *quantità di informazione* elaborata ed erogata dagli operatori nelle moderne condizioni di lavoro. Perciò il primo problema che si pone è di stabilire quale specie di "informazione" sia il prodotto specifico degli esseri umani nello svolgimento delle attività produttive. In questo scritto cercherò di presentare alcune idee circa la formulazione e la soluzione di questo problema. A questo scopo passerò brevemente in rassegna i principali concetti riguardanti la nozione di lavoro che si sono dati in ambito scientifico.

I.3. La nozione di lavoro nella fisica

Come rilevava verso la seconda metà dell'800 l'ingegnere tedesco Franz Reuleaux,⁽²⁾ teorico delle macchine in un periodo storico in cui esistevano motori a vapore di vario tipo ma non ancora quelli elettrici e quelli a scoppio, la storia della tecnologia, nella sua fase arcaica primitiva, è caratterizzata dall'adozione progressiva di una serie di artifici volti all'eliminazione delle forze applicate inutili; vale a dire volti all'eliminazione da ogni attività produttiva della necessità di usare la forza muscolare umana per funzioni di puro sostegno o puntellamento. Il significato di questo

progresso appare chiaro non appena si considera che, per quanto il mantenimento di un muscolo in tensione richieda un continuo dispendio di energia, la forza applicata da tale muscolo non produce alcun lavoro meccanico. Le forze muscolari fisse furono eliminate ai primordi della civiltà introducendo nelle tecniche lavorative opportuni sistemi di vincoli (assi imperniati, guide, punti di appoggio, carichi gravitazionali, ecc). Nel mondo antico il progresso principale consistette nell'adozione di artifici atti a trasformare le direzioni e le intensità delle forze: leve, pulegge, argani, ruote, carrucole ecc, insomma tutto il repertorio delle macchine semplici.

Nell'epoca moderna fu compiuto un progresso decisivo nella comprensione e nel controllo dei comportamenti inerziali della materia e nell'utilizzo delle forze inerziali (uso di proiettili, martelli, battipali, volani, navette volanti nei telai tessili ecc). Possiamo affermare che tutti gli artifici meccanici fondamentali, e la stessa scienza della meccanica, erano già completamente sviluppati alla fine del '700. Di ciò si aveva un esempio stupendo nella ricchissima raccolta di macchine utensili settecentesche, riprodotte assai fedelmente in scala ridotta, che riempivano decine di banconi in un gran salone del vecchio *Musée des Artes et Métiers* di Parigi (ora disgraziatamente smembrato e disperso in piccoli musei e depositi inaccessibili al pubblico). Possiamo affermare che quando furono introdotti i motori non si richiese altro, per il progresso della meccanica industriale, che il perfezionamento di conoscenze già acquisite. E' interessante rilevare che, contrariamente a quanto si potrebbe credere, il termine "lavoro meccanico", nell'accezione correntemente usata nei testi di fisica, fu introdotto nel linguaggio scientifico in tempi relativamente recenti, quando ormai la disciplina della meccanica era già completamente sviluppata.

La nozione di lavoro meccanico fu introdotta col nome di *moment d'activité* dal generale matematico Lazare Carnot,⁽³⁾ che intendeva indicare con questo termine la grandezza fisica che si mantiene invariata nella trasduzione di forze applicate in ingresso in forze prodotte in uscita, attraverso congegni meccanici d'inerzia e attrito trascurabili: *la somma delle forze per gli spostamenti in ingresso uguaglia quella delle forze per gli spostamenti in uscita*. È opportuno ricordare che quel geniale personaggio è anche noto per aver introdotto nella matematica il concetto di *isomorfismo* tra oggetti geometrici anche assai diversi,⁽⁴⁾ mettendo in evidenza la straordinaria importanza che ha, per la formazione di questo concetto, la determinazione delle *proprietà invarianti per trasformazione*.

Le idee di Carnot esercitarono una notevole influenza in tutti i campi della scienza; per esempio, negli esperimenti di Ampère, volti a determinare le forze magnetiche generate da circuiti elettrici di forme diverse, e persino nell'anatomia comparata di Cuvier, volta a stabilire le correlazioni anatomiche tra animali di specie anche assai diverse. Ispirandosi a questi concetti, egli stesso contribuì in modo importante a organizzare, in collaborazione col generale Bonaparte, il nuovo stato francese dotandolo di strutture amministrative e organizzative ispirate al principio di isomorfismo e istituendo il criterio di corrispondenza tra i gradi dei funzionari statali.

Tuttavia questa nozione di lavoro fu incorporata esplicitamente per la prima volta nei testi di meccanica da Poncelet, ufficiale napoleonico allievo di Carnot, fondatore della geometria proiettiva e primo grande teorico della meccanica applicata. Riporto qui un passo tratto dal capitolo di un suo testo: *Sul lavoro meccanico (travail mécanique) delle forze e sulla sua misura*.

“Lavorare è vincere o distruggere, per il bisogno delle arti, delle resistenze quali la forza di adesione delle molecole dei corpi, la forza delle molle, quella del peso, l'inerzia della materia ecc. Consumare, lucidare un corpo con l'attrito, dividerlo in parti, elevare dei carichi, trascinare un



Lazare Carnot
(1753-1823)



Jean Victor Poncelet
(1788-1867)

veicolo lungo un cammino, armare una molla, lanciare pietre, bocce ecc; ciò è lavorare, è vincere, per tutta una certa durata di tempo, delle resistenze sempre rinnovate per tutta la durata del tempo."

"Il lavoro meccanico non suppone solamente una resistenza vinta una volta per tutte, o tenuta in equilibrio da una forza motrice, ma una resistenza costantemente distrutta lungo tutto il cammino percorso dal punto sul quale la forza motrice si esercita e nella direzione di questo stesso cammino. Per togliere con un utensile una particella di materia a un corpo, per esempio, non solamente occorre uno sforzo direttamente opposto alla resistenza che presenta questa particella, ma bisogna anche far avanzare il punto d'azione dell'utensile nella direzione della resistenza: più questo avanzamento sarà grande, più il frammento tolto sarà lungo: d'altro canto più sarà grande la larghezza e lo spessore di questo frammento, più saranno grandi la resistenza e lo sforzo; l'opera fatta, a ciascun istante, cresce dunque coll'intensità dello sforzo e colla lunghezza del cammino descritto nella sua stessa direzione. Un ragionamento analogo è applicabile a tutti i lavori industriali che richiedono l'aiuto di utensili o di macchine".⁽⁵⁾

A proposito di questo testo è interessante rilevare questo aspetto paradossale: quando Poncelet adottò il termine: "lavoro meccanico" mutuandolo dal linguaggio comune - in quanto era convinto che ogni attività lavorativa umana fosse riducibile ai termini di forze applicate a punti mobili - nelle grandi industrie allora nascenti il lavoro umano, grazie all'introduzione della forza motrice dei motori a vapore, stava già diventando attività di controllo delle macchine operatrici, e la forza muscolare umana, in quanto fattore incidente sulla lunghezza dei tempi di lavoro, cominciava già ad assumere un ruolo secondario.

Il lavoro umano cui Poncelet faceva riferimento poteva riguardare più le caratteristiche del lavoro artigianale che quelle del lavoro industriale. D'altronde, fu proprio da allora che cominciò a diffondersi l'idea che il lavoro umano avesse in qualche modo nell'omonima grandezza fisica la sua misura quantitativa naturale. Questo è un esempio di come il progresso tecnico-scientifico dei mezzi di produzione, nel momento stesso in cui crea apparecchiature artificiali capaci di riprodurre le funzioni proprie degli organismi umani, fornisce anche le basi conoscitive che rendono possibile la comprensione scientifica degli stessi organismi umani.

Ma quando ciò avviene - mi preme sottolineare proprio questo aspetto - le attività produttive si sono già dislocate su un piano superiore rispetto a quello divenuto oggetto di trattazione tecnico-scientifica. Ciò capitò in passato per il lavoro meccanico, oggi questo capita per quello informatico. Parafrasando una celebre annotazione di Marx, possiamo affermare che è in larga misura dall'anatomia delle macchine che noi traiamo i mezzi concettuali per la comprensione dell'anatomia umana, ma dobbiamo anche aggiungere che, quando le capacità produttive umane si presentano simili a quelle delle macchine, il lavoro umano ha già subito una profonda trasformazione



Nicolas Léonard Sadi Carnot
(1796-1832)

qualitativa, che lo differenzia in modo sostanziale da quello riconoscibile nelle macchine. Ciò avviene in modo analogo a come nella logica si passa dal livello del linguaggio a quello del metalinguaggio. Possiamo affermare che, quando Poncelet giungeva a ravvisare nel concetto di lavoro meccanico la forma oggettivata del lavoro umano, questo aveva già acquistato, nelle sue espressioni più evolute, un carattere *meta-meccanico*.

L'introduzione della nozione di lavoro meccanico ebbe ripercussioni amplissime nella scienza dell'800. Subito dopo l'introduzione di questa nozione nella fisica, fu scoperto il più importante teorema che connette la meccanica alla termodinamica. Infatti, fu proprio nel 1824 che Sadi Carnot, figlio di Lazare e collega di Poncelet all'*École Polytechnique* di Parigi, pubblicò il suo celebre lavoro sulla "potenza

motrice del fuoco”,⁽⁶⁾ in cui spiegava come e perché il rendimento lavorativo delle macchine termiche è invariante per variazioni di forma e tipo dei cicli termodinamici reversibili. Come fu riportato in una nota manoscritta di Sadi, in una tarda riedizione del suo famoso libretto curata dal fratello Hyppolite, l'estensione alla termodinamica della nozione invariante di lavoro introdotta dal padre lo aveva portato ad anticipare di un quarto di secolo la scoperta della conservazione dell'energia (che, a dire il vero, lo stesso Lazare aveva ipotizzato avendo mutuato l'idea da Leibniz). Purtroppo le sue ricerche furono interrotte dalla sua morte prematura per colera.

I.4. La scoperta dell'energia



Hermann von Helmholtz
(1821-1897)

Nel 1847 apparve l'articolo del fisico-fisiologo prussiano Hermann von Helmholtz intitolato “*Sulla Conservazione della Forza*”,⁽⁷⁾ nel quale si dava per la prima volta un robusto fondamento teorico al principio di conservazione dell'energia. “Forza” (*Kraft*) era il nome dell'energia secondo una dizione allora in uso, quando ciò che ora chiamiamo semplicemente “forza” si chiamava invece “forza motrice”. La scoperta di Helmholtz derivava direttamente dal postulato dell'impossibilità del moto perpetuo, noto anche come *primo principio della termodinamica*; vale a dire, dall'assunzione che non esiste alcun sistema fisico che possa ritornare allo stato iniziale dopo aver scambiato quantità non nulle di lavoro e/o calore con l'ambiente esterno. Il principio di conservazione dell'energia estendeva così, in modo naturale, le nozioni invariantive di lavoro meccanico e di lavoro termodinamico introdotte dai Carnot. Essa poté essere formulata con sicurezza solo dopo il 1845,

quando il fisico inglese James Prescott Joule pubblicò un articolo in cui si forniva la prova sperimentale dell'equivalenza quantitativa tra lavoro e calore.

Dopo la scoperta del carattere conservativo dell'energia, fu chiaro che il lavoro meccanico e il calore non erano altro che particolari forme di trasferimento di energia. Dato che la propagazione di energia sonora è interpretabile in termini di forze applicate da molecole d'aria sulle molecole che si muovono nelle vicinanze, per diverso tempo si è creduto che l'energia di un sistema fisico potesse definirsi in ogni caso come *capacità del sistema di compiere lavoro meccanico*; ciò a dispetto del fatto che da un punto di vista macroscopico la trasmissione di calore non potesse farsi rientrare in questa definizione. Questa diffusa credenza fu tanto solida da indurre il fisico inglese James Clark Maxwell (1821-1879) a cercare una spiegazione meccanica per la propagazione delle onde elettromagnetiche e di una micromeccanica per la propagazione del calore.

È opportuno ricordare che verso la fine dell'800 il dibattito filosofico-scientifico europeo fu caratterizzato dall'opposizione di due punti di vista proprio in relazione al significato fisico dell'energia. Da un lato si ponevano i *meccanicisti*, che concepivano l'energia come capacità di un sistema di compiere lavoro meccanico, vale a dire come una pura variabile matematica priva di significato sostanziale; dall'altro gli *energetisti*, per esempio il chimico lettone Wilhelm Ostwald (1853-1932), che la ritenevano invece una vera e propria sostanza materiale, la quale, pur trasformandosi nelle forme più disparate, si conserva tuttavia esattamente in quantità. Ma con il passare del tempo il dibattito si spense perché fu evidente che l'energia trasportata dalla corrente elettrica, dalle onde elettromagnetiche, dagli idrocarburi nei motori a scoppio, dalle molecole di glucosio negli organismi viventi, non sono riconducibili né alla forma del lavoro meccanico né a quella del calore. Il concetto di energia, non solo in senso proprio, ma anche in sensi traslati, si diffuse ampiamente nella cultura generale modificando profondamente le radici del senso comune. Si pensi per esempio alla teoria freudiana della *libido* intesa come energia psichica conservativa che è suscettibile di essere trasformata e dirottata in altre forme nelle patologie isteriche.

1.5. La scoperta dell'entropia

Il principio di conservazione dell'energia discende dall'ipotesi di reversibilità dei sistemi fisici, che a sua volta si deduce dall'invarianza delle leggi fisiche per inversione del tempo. Se attriti e produzioni di calore possono far apparire irreversibili i comportamenti macroscopici dei sistemi, ciò dipende dal fatto che una parte dell'energia si disperde nei moti microscopici del sistema.

Poiché è praticamente impossibile fornire una descrizione completa dei moti microscopici, si rende necessario passare a una rappresentazione incompleta del sistema introducendo, per compensazione, alcune variabili che rappresentano in qualche modo gli effetti macroscopici medi di tali moti; per esempio temperature, pressioni, concentrazioni molecolari ecc. Gli stati dei sistemi fisici rappresentati in questo modo, e i sistemi stessi, si chiamano *termodinamici*.

L'idea che l'energia termica non sia altro che energia meccanica molecolare e che, pertanto, il calore trasmesso per contatto non sia altro che lavoro meccanico fatto dalle molecole di un corpo su quelle di un altro, suscitò subito l'interrogativo se fosse possibile utilizzare in qualche modo l'energia termica contenuta nelle grandi masse materiali, per esempio nella crosta terrestre o nell'acqua dei mari, per produrre energia meccanica utilizzabile a livello macroscopico.

La possibilità di rispondere affermativamente a questo problema si scontrava col fatto che le macchine ideali descritte da Sadi Carnot riescono a convertire energia termica in lavoro meccanico solo perché il calore tende a passare spontaneamente dai corpi più caldi a quelli più freddi e mai viceversa. Se esistesse un processo fisico capace di estrarre l'energia termica della materia, si potrebbe produrre lavoro meccanico raffreddando il mare, ottenendo così *un motore perpetuo di seconda specie*; oppure utilizzare questa energia per riscaldare un corpo più caldo del mare, ottenendo così un trasferimento di calore da un corpo freddo a uno caldo senza spesa di energia.



Rudolf Julius
Emanuel Clausius
(1822-1888)

La negazione di questa possibilità è nota come *secondo principio della termodinamica*. La non esistenza di processi fisici capaci di violare il secondo principio della termodinamica è simile per molti aspetti alla non esistenza di processi fisici capaci di violare il primo. In entrambi i casi si tratta del fatto che nessun sistema isolato può ritornare allo stato iniziale producendo una quantità positiva di lavoro. Nel caso studiato da Helmholtz, questa assunzione portava a stabilire che l'energia interna di una macchina capace di funzionare in modo reversibile è una pura funzione del suo stato interno.



Ludwig Boltzmann
(1844-1906)

In modo analogo, il fisico prussiano Clausius giunse a stabilire nel 1865 l'esistenza di una *seconda funzione di stato* per tutti i sistemi termodinamici che possono evolvere in modo reversibile. Questa funzione è calcolabile per ogni sistema in equilibrio termodinamico se tutte le trasformazioni di stato possono essere eseguite tanto lentamente da non perturbare apprezzabilmente l'equilibrio (*trasformazioni adiabatiche*). Tale funzione, che Clausius chiamò *entropia*, rappresenta una grandezza fisica di tipo nuovo. Essa si conserva rigorosamente in ogni sistema termodinamico che, pur subendo una variazione di energia interna, evolve adiabaticamente senza scambiare calore col mondo esterno. In definitiva, l'esistenza dell'entropia implica che tutti i sistemi termodinamici, per quanto in generale evolvano in modi irreversibili, possono tuttavia essere trasformati reversibilmente mediante trasformazioni sufficientemente lente. Egli dimostrò che quando un corpo che si trova alla temperatura assoluta T assorbe reversibilmente una quantità di calore dQ , la sua entropia aumenta di una quantità $dS=dQ/T$. A differenza dell'energia, l'entropia di un sistema isolato non si conserva se vengono meno le condizioni di reversibilità; inoltre può

solo aumentare, diventando massima quando il sistema raggiunge l'equilibrio termodinamico, vale a dire quando la temperatura raggiunge lo stesso valore in tutte le parti del sistema.

Il progresso successivo fu compiuto da Maxwell e dal fisico austriaco Boltzmann, che si proposero di ricondurre la termodinamica alla meccanica trattando gli stati microscopici dalla materia in modo probabilistico. Nacque così la *meccanica statistica*. Verso il 1872 Boltzmann scoprì che nella meccanica statistica l'entropia S si presenta come una funzione delle probabilità p_n degli stati microscopici $n=1, 2, \dots, N$, *assunti come un insieme discreto*, giusto secondo l'equazione

$$S = -k_B (p_1 \ln p_1 + p_2 \ln p_2 + \dots + p_N \ln p_N), \quad [1]$$

dove $\ln p_n$ è il logaritmo naturale di p_n (sempre negativo perché $0 \leq p_n \leq 1$), e $k_B = 1,38 \times 10^{-16}$ erg/grado è la costante di Boltzmann. Egli non poteva sospettare che la discretizzazione degli stati microscopici, che era necessaria affinché l'entropia non assumesse mai valori infiniti, avrebbe condotto i fisici del '900 a scoprire la teoria dei quanti.

Si ottennero così due diverse determinazioni dell'entropia: quella di Clausius, basata su misure di temperatura e calore trasferito, e quella di Boltzmann, basata su valutazioni di probabilità degli stati microscopici. Dalla formula di Boltzmann si deduce che l'entropia è massima quando tutti gli stati sono equiprobabili, vale a dire quando la rappresentazione del sistema è massimamente incerta, ed è nulla quando una probabilità è uguale a 1 mentre tutte le altre sono uguali a zero, vale a dire nelle condizioni di massima certezza circa lo stato effettivo del sistema.

Fu allora evidente che l'entropia rappresenta in qualche modo il grado di "disordine interno" della materia. Tuttavia, per poter attribuire un significato oggettivo a questo disordine, distinguendolo da uno "stato di ordine microscopico", bisognava supporre che è impossibile descrivere gli stati microscopici di un sistema termodinamico. Alla fine dell'800 non si poteva sapere che questa oggettività del disordine microscopico è dovuta all'*indeterminazione quantistica*.

L'impossibilità di recuperare l'ordine iniziale dei sistemi che subiscono una degradazione dell'ordine interno senza spendere energia fece comprendere che l'esistenza degli organismi viventi è possibile solo se la naturale tendenza alla degradazione dell'energia in calore e alla disgregazione della loro organizzazione è contrastata da una continua spesa di energia. Perciò gli organismi viventi non dovevano più essere immaginati come automi meccanici e idraulici di cartesiana memoria, ma come sistemi termodinamici consumatori di energia (sebbene non fosse per niente chiaro quali fossero i meccanismi microscopici restauratori dell'ordine interno). Si può facilmente immaginare quale diatriba scientifica e filosofica si sia potuta scatenare a questo riguardo tra meccanicisti, energetisti e vitalisti.

Quali strane forme assume l'energia nei sistemi viventi? Bastano i processi chimici e termodinamici a spiegare ciò che accade negli organismi viventi? Oppure certe straordinarie virtù degli esseri viventi sono di tutt'altra natura? Una cosa appariva tuttavia chiara: il lavoro umano, in quanto processo ordinatore e organizzatore della materia, doveva interpretarsi come un'erogazione di energia. Da qui nasce l'idea che il lavoro produttivo è misurabile perché l'energia è misurabile.

1.6. Il superamento dell'energetismo

Le idee meccaniciste ed energetiste, che informarono in maniera ampia e profonda la cultura laica e materialista di fine '800, sono profondamente radicate anche nella cultura contemporanea; non tanto tra i fisici, quanto invece in altri ambiti culturali. Si pensi ad esempio quanto sia ancora impregnato di meccanicismo ed energetismo il concetto di forza-lavoro originariamente introdotto da Marx nell'analisi dei processi produttivi, a dispetto del fatto che oggi il lavoro umano, inteso come attività conforme a uno scopo, non sia tanto pensabile come "erogazione-dispendio di energia fisica", quanto piuttosto come "erogazione-dispendio di energia nervosa".

In realtà l'espressione "energia nervosa" non denota alcunché che sia dotato di preciso significato scientifico, essendo solo un modo di dire entrato nell'uso comune. Questa improprietà linguistica aiuta solo a mantenere in voga un concetto popolare di lavoro produttivo inteso come un'attività volta a determinare, direttamente o mediante l'impiego di mezzi di produzione, la creazione di oggetti fisici utili all'esistenza umana. Così, in definitiva, si finisce per assegnare tutti i prodotti del lavoro alla classe degli oggetti materiali. È chiaro che la produzione di un'idea, di un'invenzione, di una scoperta scientifica, la scrittura di un libro ecc, per quanto socialmente utili, non rientrano per nulla in questa classificazione. Chiaramente, la principale conseguenza negativa di questo modo di considerare il lavoro è la tendenza a mantenere una rigida distinzione tra la nozione di *lavoro manuale* e quella di *lavoro intellettuale*; una tendenza rafforzata dall'idea di una quantificabilità del primo e di non quantificabilità del secondo. In questo modo si può finire col credere che il lavoro umano stia progressivamente sparendo dalle società sviluppate.

È vero invece che il moderno sviluppo delle capacità produttive e dei nuovi mezzi di produzione impone una revisione radicale del concetto tradizionale di lavoro produttivo al fine di comprendere, quali aspetti diversi di una medesima categoria generale di lavoro, anche le attività che non sono direttamente produttive di beni materiali "palpabili" e che possono pertanto dirsi produttive di beni immateriali o *impalpabili*.

Per giungere a questo bisogna necessariamente partire da un'analisi scientifica rigorosa di ciò che è effettivamente il lavoro umano in quanto attività conforme a uno scopo: primariamente, come *attività di acquisizione, elaborazione, produzione di informazione* e solo secondariamente come erogazione di energia fisica.

Il fatto è che, durante la lavorazione di una materia prima per la produzione di un oggetto, o durante l'attività di controllo di un mezzo di produzione, ma più in generale durante un'attività produttiva di qualsiasi tipo, tra l'uomo e l'oggetto del suo lavoro si attua un processo naturale in cui si combinano due diversi fattori:

- Una trasmissione di energia sotto forma di lavoro meccanico.
- Una trasmissione di informazione (in un senso che sarà precisato più avanti).

L'informazione, a differenza dell'energia, non è una grandezza fisica né una proprietà della materia, dato che il contenuto d'informazione di un oggetto fisico (ad esempio di un libro, di una fotografia o di un disco fisso) dipende in modo essenziale dall'esistenza di apparati esterni capaci di utilizzarla (decodificarla, interpretarla, tradurla, trasmetterla ecc). In definitiva, l'informazione esiste solo in relazione all'esistenza o alla possibilità di esistenza di esseri pensanti e comunicanti.

Essa non è nemmeno una nozione primitiva derivabile dall'esperienza, poiché, come vedremo, può essere definita sulla base della nozione primitiva d'*incertezza*; precisamente come *riduzione d'incertezza*. Per esempio, quando lanciamo un dado otteniamo un'informazione perché prima del lancio, diciamo *a priori*, siamo incerti su quale delle sei facce apparirà; e dopo il lancio, diciamo *a posteriori*, l'incertezza è completamente annullata poiché sappiamo quale dei sei possibili risultati si è realizzato. Quando facciamo una scelta, o prendiamo una decisione, non importa di quale genere, produciamo un'informazione perché determiniamo una riduzione dell'incertezza relativa al fatto che, a priori, era dato un certo insieme di possibilità e, a posteriori, una sola si rivela attuata.

Decidendo, scegliendo, noi determiniamo una riduzione del ventaglio delle possibilità iniziali; così facendo otteniamo un risultato che possiamo concepire come una riduzione di una precedente incertezza. Pertanto, produrre informazione significa in generale mettere in atto uno stato di cose o un processo reale che a posteriori si presenta come una restrizione di possibilità entro un più ampio insieme di possibilità a priori di qualche determinata specie.

È evidente come tutto questo sembra in qualche relazione con le cose che accadono nel mondo della produzione e con quelle che riguardano la produttività del lavoro. In quali modi? In quali forme? Con quale rapporto rispetto alla concezione energetista del lavoro produttivo?

II. LA NOZIONE INFORMATONALISTA DI LAVORO

II.1. La misura dell'informazione

Nel 1948, circa un secolo dopo la scoperta dell'energia, una rivista tecnica americana pubblicò l'articolo di Shannon “*La Teoria Matematica delle Comunicazioni*”,⁽⁸⁾ in cui si dava per la prima volta fondamento scientifico alla nozione d'informazione e alla misura della sua quantità.

La scoperta è precisamente questa: la nozione comune generica d'informazione, quale noi la intendiamo quando per esempio parliamo di ricevere, trasmettere, registrare, ricordare, tradurre ecc, un'informazione, è suscettibile di una trattazione scientifica rigorosa basata sul fatto che è possibile definire una misura oggettiva di quantità di informazione e, corrispondentemente, di una sua unità di misura (usualmente il *bit*).

Da quel momento in poi, la nozione d'informazione, cui prima si attribuivano significati soggettivi e generici, quasi sempre riferiti a casi e contesti particolari, divenne un concetto scientifico preciso, che era in grado di fornire la chiave interpretativa di un gran numero di fenomeni e di rendere possibile la formulazione e la soluzione di problemi nuovi in campi del sapere che prima erano più oggetto di meditazioni filosofiche che di trattazione scientifica.

Nonostante la sua natura matematica, la teoria dell'informazione non ha nulla a che fare con le nozioni e i concetti della fisica: una stessa informazione può essere contenuta nei più disparati stati della materia e trasmettersi attraverso i più disparati processi fisici. Nella comunicazione verbale, un messaggio elaborato dalla mente umana sotto forma di un sistema di impulsi nervosi si traduce in un sistema di contrazioni muscolari della gabbia toracica, dell'apparato laringo-labiale ecc, quindi si trasforma in un complesso di vibrazioni dell'aria, infine si converte di nuovo in un sistema di impulsi nervosi nel cervello di un ascoltatore ecc: la stessa informazione passa attraverso una sequenza di trasformazioni fisiche senza perdersi per strada.

Questo esempio chiarisce bene perché non bisogna confondere l'informazione con i processi fisici che ne rendono possibile il trasporto, o con gli stati fisici che ne permettono la conservazione; in altri termini, che non si deve confondere il *messaggio* con il *segnale* che lo trasporta o con la *traccia* che lo memorizza in un supporto fisico. Questa distinzione tra messaggi e segnali, tra contenuti d'informazione e processi fisici che rendono possibile il trasporto e la conservazione dell'informazione, è ancor più evidente se si considera che uno stesso messaggio può essere trasportato da segnali molto diversi e memorizzato in supporti materiali molto diversi e che, viceversa, uno stesso segnale può veicolare messaggi molto diversi.

La teoria dell'informazione è, insomma, una teoria matematica nella quale si fa completamente astrazione dai mezzi fisici che rendono possibile l'esistenza dell'informazione. Prima che la misura quantitativa dell'informazione fosse riconosciuta come una nozione scientifica ben fondata, i processi di trasmissione e di elaborazione dell'informazione non potevano essere concepiti altrimenti che come modi di comunicazione del pensiero, ma in un senso generico e impreciso.



La figura riportata qui sopra descrive simbolicamente un *sistema di comunicazione* secondo la visuale di Shannon.⁽⁸⁾ Esso è formato come segue:



Claude Elwood Shannon
(1916-2001)

- La *sorgente* d'informazione sceglie un *messaggio* tra un insieme di messaggi possibili. Il messaggio scelto può consistere di parole scritte o dette, oppure di immagini, musica ecc.
- Il *trasmettitore* converte questo messaggio nel *segnale*, il quale è inviato al *ricevitore* tramite un *canale di comunicazione* (linea telefonica, onde sonore, onde elettromagnetiche ecc.)
- Il *ricevitore* è una specie di trasmettitore alla rovescia, il quale riconverte i segnali trasmessi in un messaggio e che invia questo messaggio a *destinazione* (gli utenti terminali).
- La *sorgente di rumore* (per esempio rumore termico, interferenze, deformazioni dovute al malfunzionamento del trasmettitore o del ricevitore, ecc). Questa disturba il segnale trasmesso e riduce la *capacità di trasmissione d'informazione* del canale.

I problemi posti da Shannon erano:

1. Come si misura la *quantità d'informazione*?
2. Come si misura la *capacità di un canale di comunicazione*?
3. La conversione di un messaggio in segnali comporta spesso un *processo di codifica*. Come si può migliorare la codifica in modo da aumentare la quantità d'informazione trasmessa? Se esiste una codifica ottimale, a quale velocità può il canale convogliare informazione?

1. Come si possono ridurre gli effetti del rumore e possibilmente neutralizzarli?

Il primo risultato importante ottenuto da Shannon fu che la nozione di informazione presuppone quella più fondamentale d'*incertezza*: un messaggio contiene informazione perché riduce l'*incertezza* di attesa del destinatario. Una sorgente che emetta sempre lo stesso messaggio non trasmette in realtà nessun messaggio, giacché il destinatario sa già quale messaggio riceverà. In altri termini, la funzione del messaggio è di ridurre l'*incertezza* del destinatario. Chiaramente, questo presuppone che il destinatario sappia qual è il repertorio di messaggi che la sorgente può trasmettere. Del resto, se non sapesse quali sono tutti i possibili messaggi che può ricevere, potrebbe non essere in grado d'interpretare qualcuno dei segnali provenienti dal suo ricevitore. In pratica, gli rimarrebbe un'*incertezza* aggiuntiva che non sarebbe in grado di eliminare. Questo è ciò che capita in realtà a causa del rumore. Il rumore modifica i messaggi introducendo in questi delle componenti imprevedibili che esulano dall'insieme dei messaggi attesi dal destinatario.

Il secondo risultato importante fu la teoria della *compressione dell'informazione*, vale a dire lo studio dei metodi di codificazione decodificazione che permettono di ridurre la quantità di informazione necessaria per veicolare i messaggi senza renderli incomprensibili. La massima riduzione di informazione che si può ottenere definisce la *ridondanza* del messaggio. Su questa base Shannon dimostrò che i messaggi sono tanto più resistenti al rumore quanto più sono ridondanti e che, se la ridondanza è nulla, allora il più piccolo difetto del messaggio distrugge l'intero messaggio.

Per quanto Shannon non mirasse a spiegare come l'informazione si rapporta alla fisica dei segnali e dei sistemi di memoria, che si proponesse solo di risolvere i problemi che riguardano la comunicazione da un punto di vista puramente matematico (principalmente in relazione ai problemi di codificazione ottimale che si presentano in telefonia e in radiofonia) e che addirittura trovasse insensato parlare di "valore" dell'informazione, la sua teoria si rivelò ben presto straordinariamente ricca d'implicazioni e conseguenze per tutti i campi del sapere, tanto da diventare un pilastro centrale della scienza contemporanea.

In particolare, insieme alla teoria degli algoritmi essa divenne la base teorica generale dell'informatica, intesa come scienza dell'elaborazione dei dati mediante macchine processatrici d'informazione. Innanzi tutto, essa tratta del problema generale della codificazione e della decodificazione dell'informazione contenuta in messaggi di vario tipo (scritti, parlati, audio, video ecc). Questi processi possono concepirsi come metodi di trasformazione-traduzione ottimale al fine ridurre l'incidenza del rumore e conservare la quantità di informazione.

Essa fornì, inoltre, la base teorica per lo studio dei procedimenti di calcolo e dei processi di elaborazione d'informazione che avvengono nella mente umana. Un'intera branca della psicologia sperimentale prese avvio fin dall'inizio degli anni '50 dalla teoria dell'informazione. Come sarà spiegato più avanti, questo tipo di ricerche ottenne subito un importante risultato che possiamo così riassumere: *l'attività consapevole della mente umana consiste in un processo di elaborazione di informazione capace di tradursi in decisioni operative con un ritmo medio che, al massimo, oscilla attorno ai sette bit al secondo*, e ciò in modo indipendente dalla qualità e dalla complessità della mansione. Questo risultato è l'unico conosciuto che ci permette di dare un significato approssimativamente oggettivo a una nozione di *quantità di lavoro* proporzionale al tempo di lavoro. Le implicazioni e le conseguenze di questo risultato, per quanto riguarda la formazione di una più evoluta concezione del lavoro umano, si sono rivelate assai più interessanti e numerose di quanto si poteva immaginare in un primo momento.

Dopo lo sviluppo dei calcolatori e dell'informatica, non possiamo più affermare che l'elaborazione dell'informazione sia una facoltà esclusiva degli esseri viventi in generale e della mente umana in particolare. Dobbiamo anzi riconoscere che la rivoluzione concettuale resa possibile dalla questa teoria ha ampliato la nozione d'informazione oltre il campo della comunicazione umana, promuovendola al rango di un'entità naturale astratta che, pur trascendendo il livello puramente fisico dei processi naturali, è tuttavia esistente e operante nel mondo macroscopico ovunque si diano processi di trasformazione ed evoluzione. Per quanto l'informazione non sia un'entità fisica, e debba perciò considerarsi un'entità "metafisica", essa appartiene tuttavia all'ordine delle cose dotate di esistenza naturale. Possiamo così affermare che *il dualismo classico materia-spirito di seicentesca memoria è stato rimpiazzato nella cultura contemporanea da un dualismo di tipo nuovo: quello tra realtà fisica e informazione*.

II.2. Informazione e incertezza

La nozione d'informazione presuppone quella d'incertezza. Infatti, noi possiamo introdurre la nozione d'informazione tutte le volte che abbiamo a che fare con l'incertezza relativa a un insieme di possibilità, rappresentata da una certa funzione delle misure probabilistiche di tali possibilità.

Possiamo quindi definire l'informazione come una restrizione del ventaglio delle possibilità, magari fino alla determinazione di una particolare possibilità entro l'insieme di tutte le possibilità.

Per esempio, quando lanciamo un dado otteniamo un'informazione proprio in quanto prima del lancio sono possibili diversi esiti e dopo il lancio tra tutti gli esiti possibili ne risulta determinato uno specifico. Analogamente, quando facciamo una scelta tra due alternative, noi produciamo un'informazione proprio in quanto annulliamo l'incertezza dovuta alla circostanza che, prima della scelta o della decisione, a priori dalla determinazione specifica, si aveva a che fare con due possibilità. Se le due possibilità a priori erano equiprobabili, vale a dire, se avevano rispettivamente probabilità $1/2$ e $1/2$, allora la quantità d'informazione prodotta risulta pari a un *bit*. Il bit è fissato, proprio con questa definizione, come l'unità di misura dell'informazione. Se per prendere una decisione complessa, o per fare una scelta complessa, noi dobbiamo vagliare una sequenza di decisioni o scelte parziali, in modo che ciascuna di queste si presenti come un'alternativa tra un *sì* e un *no*, allora dobbiamo produrre tante unità d'informazione quanti sono i passi della sequenza.

Dunque, l'informazione esprime in generale la riduzione d'incertezza relativa a un insieme di possibili comportamenti; ogni diminuzione d'incertezza equivale a un acquisto d'informazione.

In termini quantitativi la misura dell'informazione si presenta perciò come differenza tra le misure dell'incertezza rispettivamente prima e dopo che l'informazione, qualitativamente intesa, si sia in qualche modo prodotta. Il termine "entropia" fu adottato da Shannon, su suggerimento di von Neumann, per indicare proprio la misura dell'incertezza.

Senza dilungarci troppo su questo argomento, basti sapere che ogni volta che la conoscenza di un insieme di possibilità - chiamiamole A_1, A_2, \dots, A_N - è definita dai rispettivi valori di probabilità - siano questi p_1, p_2, \dots, p_N - allora la misura dell'incertezza relativa a tale conoscenza, vale a dire la sua entropia, è data dalla formula:

$$H = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + \dots + p_N \log_2 p_N), \quad [2]$$

dove \log_2 è la funzione logaritmo a base due.

La ragione di questa espressione è che essa è *l'unica formula matematica* che soddisfa i requisiti del concetto intuitivo d'incertezza. In particolare, essa soddisfa alle condizioni: di essere massima quando tutte le possibilità sono equiprobabili, quando cioè $p_1 = p_2 = \dots = p_N = 1/N$; di essere tale che l'incertezza complessiva di due insiemi di possibilità indipendenti è pari alla somma delle rispettive incertezze; di assumere il valore zero se una delle possibilità è certa mentre tutte le altre sono impossibili, vale a dire se una probabilità vale 1 mentre tutte le altre sono nulle. La scelta della base due per il logaritmo consegue dalla condizione che l'entropia assuma il valore 1 se l'incertezza è relativa all'alternativa tra due possibilità equiprobabili, vale a dire se le probabilità sono 1/2 e 1/2. In questo caso si dice che l'entropia ha il valore di un *bit* (*binary digit* = cifra binaria). La misura della quantità d'informazione si presenta pertanto come differenza tra due misure d'incertezza. Se con H_1 e H_2 indichiamo le incertezze di un insieme di possibilità rispettivamente prima e dopo l'evento che riduce l'incertezza, allora la quantità d'informazione acquisita è data dalla formula:

$$I = H_1 - H_2, \quad [3]$$

che equivale grosso modo al numero di 0 e 1 necessari per specificare l'evento informatore.

La rilevanza della nozione d'informazione, in relazione al problema centrale della presente analisi, vale a dire il problema di definire il carattere specifico del lavoro umano, sta nel fatto che ogni attività produttiva umana è, da un punto di vista generale, un processo informazionale. Tuttavia essa trova applicazione in domini del sapere assai più generali e ampi di quelli che riguardano il lavoro umano. Quali sono dunque i processi informazionali che caratterizzano l'attività umana in modo specifico, distinguendola da ogni altro genere di attività naturale o artificiale; per esempio da quelli che hanno luogo nei sistemi biologici o nelle macchine?

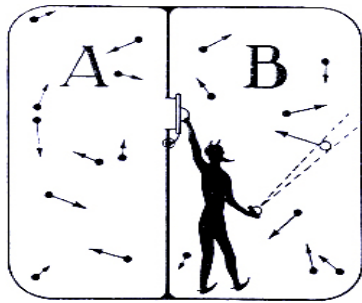
II.3. Il costo termodinamico dell'informazione

Si può notare che la formula [2] introdotta nel paragrafo precedente è molto simile alla formula [1] introdotta nel paragrafo I.5. In realtà, più che di similitudine, si tratta addirittura di proporzionalità, dato che il logaritmo a base due di un numero x è legato al logaritmo naturale dello stesso numero dall'equazione $\log_2 x = \ln 2 \times \ln x$. Si scopre così che l'entropia di Boltzmann non è altro che la misura dell'incertezza relativa allo stato microscopico del sistema termodinamico espressa in una unità di misura diversa, precisamente nell'unità *erg/grado-centigrado* invece che nell'unità *bit*.

Non si tratta solo d'incertezza relativa alla *conoscenza* probabilistica dello stato microscopico, ciò che ci porterebbe ad attribuire all'entropia termodinamica un significato puramente soggettivo, ma anche di un'incertezza oggettivamente misurabile come entropia di Clausius. L'equivalenza tra l'entropia determinata da Clausius come funzione di calori e temperature, e quella determinata da Boltzmann come funzione delle probabilità, intese come *valori di aspettazione* degli stati microscopici, trova spiegazione solo nell'ambito della meccanica quantistica, dove l'oggettività dell'incertezza termodinamica si confonde con l'indeterminazione quantistica. Qui, la perfetta corrispondenza tra la determinazione oggettiva e quella soggettiva si spiega col fatto che i *fenomeni* e gli *stati* fisici sono prodotti bilateri dell'interazione tra *sistema osservato* e *sistema osservatore*.

Il fatto che l'entropia rivesta un duplice significato, di entità fisica da un lato e di entità informazionale dall'altro, indica che esiste un profondo legame tra la termodinamica e la teoria dell'informazione. L'interfaccia che separa tra loro l'aspetto fisico e l'aspetto informazionale di ogni processo naturale è proprio quella attraverso la quale si stabiliscono le relazioni tra le trasformazioni di energia e i processi di elaborazione d'informazione: quella in cui si intrecciano, fino a confondersi, l'entropia termodinamica e quella informazionale.

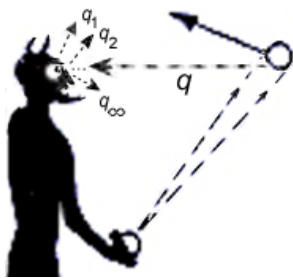
La prima conseguenza di questa intima connessione è che le variazioni di entropia di un sistema fisico equivalgono a pari variazioni d'incertezza nella rappresentazione del sistema. In particolare, una diminuzione di entropia termodinamica corrisponde ad un aumento d'informazione circa gli stati probabili di un sistema. Questa equivalenza è talmente completa che risulta persino possibile affermare che: *ogni informazione che permetta di differenziare maggiormente le probabilità degli stati microscopici è utilizzabile, in linea di principio, per diminuire di una quantità equivalente l'entropia termodinamica del sistema.*



Il demone di Maxwell secondo William Thomson (Lord Kelvin), (1824-1909).



Leo Szilard (1898-1964)



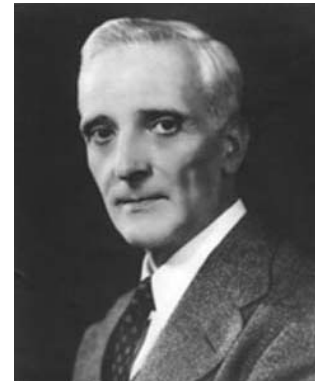
Il demone esorcizzato

energia $E = h/2\pi\lambda$, dove h è la costante di Planck. Questa degradazione consiste nell'emissione di

Già Maxwell, prima della scoperta dell'entropia di Boltzmann, aveva dimostrato che, se un ipotetico essere intelligente microscopico (il "demone" di Maxwell) potesse controllare i processi fisici microscopici sulla base delle informazioni che si suppone possa acquisire circa gli stati microscopici del sistema, esso sarebbe in grado di determinare una diminuzione di entropia del sistema spendendo una quantità di lavoro arbitrariamente piccola. Ciò sembrerebbe implicare la violazione del secondo principio della termodinamica, che afferma proprio l'impossibilità di un tale evento per ogni sistema isolato.

Tuttavia, come fu argomentato dal fisico ungherese Leo Szilard nel 1929 e, in modo più generale e completo, dal fisico canadese Leon Brillouin nel 1956,⁽⁹⁾ il "demone" di Maxwell, e al pari di questo qualsiasi dispositivo naturale capace di acquisire informazioni circa gli stati microscopici di un sistema, non è in realtà mai in grado di violare il secondo principio per la semplice ragione che i processi di misura e osservazione sono essi stessi processi termodinamici irreversibili che fanno aumentare l'entropia. Ciò dipende dal fatto che ogni apparato di osservazione può funzionare soltanto assorbendo in modo irreversibile un po' di energia del segnale che trasporta l'informazione. *Ciò determina inevitabilmente un aumento di entropia termodinamica in misura almeno pari alla diminuzione di entropia che si può ottenere utilizzando l'informazione acquisita.*

Il demone immaginato da lord Kelvin manca infatti di un dettaglio importante, che è illustrato nella figura in basso a sinistra. Per osservare una molecola, l'occhio del demone deve catturare almeno un quanto di luce q riflesso dalla particella, precisamente un fotone di lunghezza d'onda λ inferiore al diametro di questa. Ma la cattura di un fotone comporta il suo assorbimento e la degradazione della sua



Leon Brillouin (1899-1969)

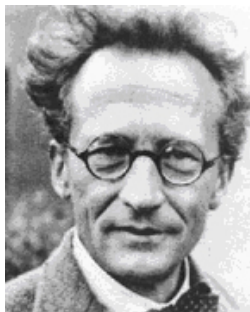
uno sciame infrarosso formato da un numero infinito di fotoni termici $q_1, q_2, \dots, q_\infty$ di energia totale pari a E (questa annotazione è impropria perché, se i quanti sono enumerati per energie decrescenti, il quanto-limite q_∞ non esiste dato che nessun fotone può avere energia zero). Questo processo determina un aumento di entropia che non può mai essere inferiore a quella che si guadagna utilizzando l'informazione trasportata dal quanto q . Al massimo si fa pari e patta. Per questa ragione il secondo principio rimane inviolato. È da notare che l'emissione e l'assorbimento di uno sciame infrarosso sono gli unici processi irreversibili ammessi in meccanica quantistica.⁽¹⁰⁾

Si ottiene così questo importante corollario del secondo principio: *ogni processo che porta all'utilizzo o alla memorizzazione di un bit d'informazione ha un costo termodinamico, che comporta un aumento di entropia almeno pari all'equivalente termodinamico del bit d'informazione guadagnato*. È chiaro che, al livello delle trasformazioni termodinamiche e dei processi di misura sui quali si basa la conoscenza dei sistemi fisici, i processi fisici e quelli informativi sono intimamente connessi.

La natura di questa connessione è tale che possiamo con tutta generalità affermare che: *ogni processo di produzione e trasformazione fisica della materia, perciò in particolare ogni processo produttivo umano, comporta sistematicamente in tutte le sue fasi la reciproca corrispondenza di entropia termodinamica ed entropia informazionale, cosicché un qualsiasi atto produttivo riveste al tempo stesso il significato di un evento fisico e quello di un processo informazionale*.

II.4. Neg-entropia o informazione termodinamica

La nozione d'informazione è strettamente imparentata con un'altra che acquistò notevole importanza scientifica verso la metà del secolo scorso: la nozione di *neg-entropia*. Con questo termine si intende la differenza $N = S_{\max} - S$ tra l'entropia massima S_{\max} di un sistema fisico alla temperatura e alla pressione dell'ambiente (20 C°) e la sua entropia attuale S . Perciò essa si annulla quando il sistema perde la sua organizzazione interna e raggiunge l'equilibrio termodinamico, mentre è tanto più grande quanto più il sistema è internamente differenziato e organizzato.



Erwin Schrödinger
(1887-1961)

Questa nozione fu introdotta nel 1943 dal celebre fisico viennese Erwin Schrödinger nel suo celebre libretto *Che cos'è la vita: gli aspetti fisici della cellula vivente*.⁽¹¹⁾ L'intento di questo autore era di fornire una misura del grado di organizzazione interna della materia, con particolare riguardo all'organizzazione dei sistemi viventi.

Negli anni '80, Pietro Omodeo, allora ordinario di Biologia Evolutiva presso l'Università di Padova, mi chiarì, in un modo per cui gli sono ancora grato, come quel libretto, abbia reso finalmente possibile il superamento delle vecchie teorie energetiste e vitaliste determinando un cambiamento radicale nel modo di concepire i sistemi viventi e aprendo così la via alla biologia moderna.

Qualche anno dopo (1950) Brillouin⁽⁹⁾ introdusse il termine d'*informazione termodinamica* come sinonimo di neg-entropia, allo scopo di sottolineare la stretta parentela che questa nozione ha con la misura della quantità d'informazione, da poco introdotta da Shannon nella teoria delle comunicazioni. Egli adottò inoltre i termini d'*informazione morta* e *informazione viva* quali sinonimi, rispettivamente, di contenuto neg-entropico "memorizzato" in modo più o meno permanente come un particolare stato di un sistema macroscopico, e di misura della neg-entropia trasferita da un sistema materiale a un altro attraverso flussi ordinati di materia e di energia.

In ogni processo naturale biologicamente rilevante, dalla fotosintesi clorofilliana ai processi nervosi, sui quali si basa l'attività pensante degli esseri umani; dai processi di replicazione e trascrizione delle eliche di DNA (acido desossiribonucleico) che avvengono nelle cellule viventi; ai processi produttivi industriali; nell'ameba come nel computer, i concetti d'informazione viva e

d'informazione morta giocano un ruolo essenziale per la comprensione scientifica di ciò che accade. Salta subito agli occhi la stretta analogia, probabilmente voluta dallo stesso Brillouin, tra i concetti d'informazione viva e morta e i concetti marxiani di lavoro vivo e morto.

II.5. L'attività informazionale dell'operatore umano

Possiamo renderci conto del fatto che anche il lavoro umano, nel senso di *attività conforme a uno scopo*, appartiene alla classe dei processi informazionali non appena prendiamo in considerazione l'attività di un operatore umano posto in un determinato contesto di produzione; per esempio, un operaio posto davanti a una macchina o a un impianto, oppure un matematico posto davanti a un foglio di carta e fornito di libri e penna, o un informatico posto davanti a un calcolatore e così via.

Preliminarmente all'attività produttiva l'operatore si pone in rapporto agli oggetti del suo lavoro in modo più o meno casuale. Subito dopo egli focalizza l'attenzione su compiti precisi. In generale, lo svolgimento di un'attività complessa richiede una successione di fasi, ciascuna delle quali inizia con uno stato di disponibilità generica e, in una certa misura indeterminata, a compiere certi atti produttivi e si conclude con l'esecuzione più o meno accurata di azioni particolari, generalmente diverse da fase a fase; l'indeterminatezza iniziale di ciascuna fase potendo dipendere in parte dall'accidentalità della postura dell'operatore in rapporto al contesto operativo e, per il resto, dalla parziale imprevedibilità dell'atto che di volta in volta si rende necessario compiere.

Insomma, l'attività dell'operatore, per quanto caratterizzata da una certa complessità, potrà essere risolta in una successione più o meno continuativa di atti elementari, all'origine di ciascuno dei quali l'operatore si trova in una condizione di provvisoria incertezza circa l'operazione da eseguire, o comunque circa le modificazioni della propria condotta. Egli, infatti, sarà in grado di decidere l'azione da compiere, tra le varie a priori possibili, non appena gli si sarà manifestata una certa situazione, tra varie altre normalmente attendibili; anzi, non appena avrà avuto il tempo di intuire quale sia l'azione da compiere in corrispondenza del manifestarsi di una certa situazione.

Se all'origine di un atto produttivo non ci fosse alcuna incertezza da ridurre circa il rapporto tra l'organismo umano e il contesto materiale di produzione, il lavoro, per quanto dovesse richiedere un dispendio di energia muscolare, potrebbe tuttavia essere svolto con movimenti automatici e soprappensiero. Poiché, invece, l'attività produttiva di un operatore umano, quale si richiede ad esempio per eseguire un lavoro di alta precisione e/o complessità, si concretizza in una sequenza di operazioni precise, i tempi di lavoro non potranno scendere al di sotto di un certo valore minimo senza che l'esecuzione del compito vada soggetta a errori incompatibili con le esigenze della produzione. Si costaterà infatti che, aumentando la velocità di lavorazione, la fatica mentale raggiunge un'intensità incompatibile non tanto con la capacità dei muscoli di erogare energia meccanica, quanto piuttosto con la capacità di mantenere l'attenzione concentrata sulla corretta esecuzione delle operazioni da compiere.

A questo punto è evidente che ci sono tutte le condizioni che si richiedono per poter definire l'atto produttivo elementare come un *evento informazionale*, e una successione concatenata di atti produttivi elementari come un *processo informazionale*.

Possiamo inoltre riconoscere in questa specie di processi sia l'aspetto dell'informazione viva, vale a dire del flusso d'informazione erogato dall'operatore durante lo svolgimento della sua attività, sia quello dell'informazione morta, vale a dire della forma e/o composizione specifica assunta dai prodotti del lavoro in conseguenza del lavoro svolto, tra le tante a priori possibili per il semilavorato. Da un punto di vista puramente informazionale, possiamo ravvisare nell'informazione viva erogata dall'operatore la qualità di "messaggio" e nell'informazione morta la qualità di "memoria", entrambe in senso generalizzato.

In alcuni casi - per esempio se l'operatore è un fisico sperimentale o un operaio - potremo considerare l'informazione viva come un messaggio "informatore di materia", e l'informazione

morta come una sorta di “memoria” che rimane, per così dire, impressa nella particolare forma e/o composizione assunta dalla materia lavorata. In altri casi - per esempio se l'operatore è un matematico, uno scrittore, un progettista ecc. - il flusso d'informazione viva potrà essere riconosciuto nell'attività di scrittura dei messaggi formati da simboli e parole, e l'informazione morta, ad esempio gli appunti, i testi scritti ecc, come la memoria di questi messaggi.

Per ragioni che saranno evidenti in seguito, converrà fare una distinzione tra questi due modi di erogare informazione e, corrispondentemente, tra queste due forme di memoria. Chiameremo *informazione pratica* quella per cui i termini messaggio e memoria hanno un significato neg-entropico; vale a dire quando si tratta di “messa in forma” di materia, come si ha nelle attività di trasformazione della materia o di costruzione e uso di oggetti materiali. Chiameremo invece *informazione semantica* quella per cui i termini messaggio e memoria rivestono un significato informazionale proprio, come si ha nelle varie forme della comunicazione umana. Così, per esempio, un disegno, una formula, un testo scritto ecc costituiscono contenuti d'informazione semantica. Questa distinzione può servire a precisare la differenza tra il *lavoro manuale* e il *lavoro intellettuale*, ma io preferisco servirmene per dimostrare invece la profonda affinità di queste due forme di attività produttiva dato che, in entrambi i casi, si tratta sempre di produzione d'informazione.

Riguardo all'attività produttiva intesa come un processo informazionale ci sarebbe ancora molto da dire e precisare, soprattutto circa l'analisi della complessità del lavoro e della distinzione tra attività ripetitive e attività creative. Ma per ragioni di chiarezza ed economia espositiva è opportuno analizzare la questione incominciando dal caso più semplice: l'atto elementare di produzione in condizioni di lavoro ripetitivo.

II.6. Atto elementare di produzione e sua misura informazionale

Consideriamo la seguente situazione sperimentale: un operatore è posto di fronte a una macchina, costituita da un pannello dotato di lampade numerate da 1 a N e da una tastiera munita di pulsanti vicini alla mano dell'operatore e ugualmente accessibili alle sue dita, anch'essi numerati da 1 a N . Il compito dell'operatore è questo: quando si accende la lampada n , l'operatore deve premere il pulsante n nel tempo più breve possibile; egli dovrà ripetere questa operazione un gran numero di volte di seguito tenendo presente che di volta in volta potrà accendersi una lampada o un'altra. L'atto elementare di produzione consiste appunto nella singola esecuzione di questo compito.

Come si può notare, si tratta di un compito molto semplice e certamente al giorno d'oggi nessun imprenditore sarebbe così folle da impegnare un essere umano per fargli fare una cosa simile; basterebbe infatti connettere elettricamente i terminali dei portalampade a dei relé agenti direttamente sui pulsanti, per ottenere in modo automatico la perfetta esecuzione dello stesso compito con velocità assai maggiore. Si badi, però, che prima dell'introduzione nelle tecniche industriali dei dispositivi elettromagnetici una analoga mansione umana sarebbe stata difficilmente sostituibile da un dispositivo automatico. Nonostante la sua irrilevanza produttiva, questo semplice esempio ci permette di trarre delle conclusioni interessanti.

Supponiamo che durante uno di questi esperimenti, consistente nella ripetizione della stessa prova per un numero molto grande di volte, le lampade si accendano di volta in volta a caso, ma con frequenze statistiche tali da potersi assegnare dei valori di probabilità p_1, p_2, \dots, p_N alle eventualità che durante ciascuna prova si accendano rispettivamente le lampade 1, 2, ..., N .

È evidente che, all'inizio di ogni prova, l'operatore si troverà in uno stato d'incertezza circa l'operazione da compiere, sebbene fino a quel momento egli abbia ripetuto l'analoga operazione un gran numero di volte. In questo esempio è facile riconoscere che l'informazione pratica erogata in ciascuno di queste operazioni elementari è la scelta di premere un particolare pulsante tra gli N a priori possibili; ciò che egli fa non appena si accende la corrispondente lampada.

Poiché in corrispondenza di queste possibilità sono associati certi valori di probabilità, potremo calcolare la misura H di questa incertezza utilizzando la formula [2] introdotta nel paragrafo II.2.

È evidente che, se si accende sempre la medesima lampada, supponiamo la 1, risulterebbe $p_1 = 1$; $p_2 = p_3 = \dots = p_N = 0$, e quindi avremmo $H = 0$. Se invece tutte le lampade si accendono con uguale probabilità $p = 1/N$, H assume il valore massimo $\log_2 N$. Per distribuzioni di probabilità diverse da queste si troverebbe per H un valore intermedio tra 0 e $\log_2 N$.

Durante ogni singola prova, il comportamento dell'operatore potrà essere interpretato nel modo seguente: all'inizio della prova la sua aspettativa circa l'operazione da compiere sarà affetta da un certo grado d'incertezza. Se egli, all'istante considerato, ha già acquisito un certa esperienza, così da intuire, magari senza rendersene ben conto, le diverse frequenze di accensione delle lampade, la sua incertezza di attesa sarà più o meno grande a seconda che le probabilità di accensione siano più o meno prossime a quelle di massima incertezza o a quelle di minima incertezza. Non appena egli avrà percepito che una certa lampada si è accesa, la sua incertezza di attesa scenderà a zero. In corrispondenza egli avrà prodotto una quantità d'informazione pari alla quantità d'incertezza d'attesa iniziale.

Illustriamo ora i risultati di alcuni esperimenti su questo tipo di produzione d'informazione. Nel 1952 lo psicologo sperimentale americano William Hick si chiese se, nel caso di un operatore



William Edmund Hick
(1912-1974)

allenato a svolgere il compito su descritto quanto più velocemente possibile, badando tuttavia a non commettere errori, esista una relazione significativa tra l'intervallo di tempo che passa tra l'istante in cui si accende la lampada e quello in cui l'operatore preme il pulsante, e la quantità d'informazione che l'operatore produce nel momento in cui sceglie il pulsante da premere; vale a dire, tra il tempo medio di risposta t in ogni prova e la quantità d'incertezza di attesa H all'inizio di ogni prova. Egli trovò che, in modo totalmente indipendente dalle probabilità di accensione delle lampade, la relazione cercata segue la semplicissima legge:

$$t = t_0 + k I, \quad [4]$$

(t = tempo di risposta, t_0 tempo minimo di risposta, I = quantità d'informazione, $1/k$ capacità del canale informativo umano). Le costanti t_0 e k variano un po' da persona a persona.⁽¹²⁾

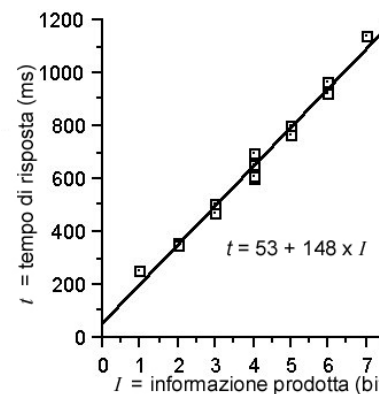
In genere, la quantità $1/k$, che possiamo interpretare come la misura della capacità di elaborazione dell'operatore umano in condizioni di rendimento ottimale continuativo, vale circa 7 bit al secondo mentre t_0 sta intorno a 0,2 secondi.



Ray Hyman
(1928 - ...)

Nel 1953, un altro psicologo americano, Ray Hyman, rifece lo stesso l'esperimento lasciando l'operatore libero di fare tutti gli errori di risposta che gli piacesse⁽¹³⁾. Trattando gli errori di risposta come rumore di canale, e utilizzando le frequenze degli errori compiuti come valori di probabilità, egli riuscì a determinare facilmente il termine di entropia aggiunta dagli errori. Sottraendo questo

termine dall'entropia dell'incertezza di attesa, calcolata come funzione delle probabilità di accensione delle lampade, egli ritrovò tale e quale la legge di Hick.



La legge di Hick e Hyman

Altre varianti di questi esperimenti confermarono la stessa legge^(14, 15, 16). Mi limito ricordare quelli dell'americano Paul Morris Fitt (1912-1965), che studiò la produzione d'informazione nello svolgimento di compiti di varia precisione, e quelli dell'inglese Alan Traviss Welford (1914-1995), che studiò il problema con riguardo allo svolgimento di più compiti simultaneamente⁽¹⁷⁾.

Combinando tra loro tutti questi risultati si ottiene la seguente legge generale: *il massimo flusso d'informazione che un operatore umano ben addestrato può erogare, nelle più svariate condizioni di precisione e complessità del compito richiesto, è di circa 6-8 bit al secondo.*

Questa legge non deve essere confusa con quella del "magico numero 7 (più o meno 2)" scoperta dallo psicologo americano George Miller nel 1956⁽¹⁸⁾, che suona in questi termini: *la massima quantità di dati, di varia complessità ma di tipo omogeneo (ad esempio un insieme di lettere alfabetiche, di numeri, di sillabe, di parole, di immagini semplici ecc), che possono essere immagazzinati nella memoria a breve termine è di 7 ± 2 dati.*

III. LAVORO PRODUTTIVO E COSCIENZA

III.1. Informazione pratica, informazione semantica e autoscienza

La legge [4] illustrata nel paragrafo II.6 fornisce un'importante risposta alle questioni poste nel paragrafo I.6. Intanto è evidente che, se interpretiamo la quantità d'informazione I , definita dalla formula [3] del paragrafo II.2, come la misura informazionale del lavoro effettuato da un operatore durante lo svolgimento di un'attività semplice o complessa in condizioni di massimo rendimento continuativo, allora si trova che la quantità di lavoro è una funzione lineare del tempo di lavoro.

Ovviamente, le costanti che intervengono nella formula di Hick e Hyman possono variare da individuo a individuo, da età a età, dipendere dalle condizioni di salute fisica, dagli stati emotivi, dalle caratteristiche di manovrabilità e controllabilità dei mezzi di produzione, ecc. Tutti questi fattori possono incidere apprezzabilmente sulla validità della legge. Bisogna tuttavia considerare che osservazioni di questo genere possono essere fatte riguardo a ogni legge che possa dedursi studiando i comportamenti di singoli individui. Da un punto di vista scientifico l'aspetto più importante non sta tanto nella precisione della legge, quanto piuttosto nelle implicazioni che discendono dall'esistenza di una relazione di tipo ben determinato tra grandezze indipendenti. Nel nostro caso, l'implicazione più significativa è che la "velocità" di elaborazione dell'operatore umano non dipende tanto dalla qualità della mansione che si trova impegnato a svolgere, quanto piuttosto dalla quantità d'informazione che, indipendentemente dalle caratteristiche qualitative del compito, si traduce in scelte operative.

Un aspetto importante di questa legge fu messo in evidenza dalle ricerche effettuate da Welford nel 1959. Ricerche che erano volte a misurare la quantità d'informazione erogata da operatori addestrati a svolgere due o tre mansioni contemporaneamente spostando rapidissimamente l'attenzione da un compito all'altro, come devono fare, per esempio, i piloti degli aerei militari. I risultati ottenuti da questo autore possono compendiarsi nella formulazione della seguente ipotesi, detta del canale unico (*single channel*):⁽¹⁷⁾

Indipendentemente dalla composizione del compito, il flusso d'informazione complessivamente erogata segue in ogni caso la legge di Hick e Hyman, come se il flusso attraversasse un canale di comunicazione avente una capacità di trasmissione di 6-8 bit/sec.

Come si spiega la presenza di questo "collo di bottiglia" nella mente dell'operatore? Welford non ha mai fornito una spiegazione neurologica di questo fenomeno, né cercato di chiarire se si tratta di un canale di comunicazione nervoso localizzato in qualche parte del cervello o se sia piuttosto un effetto neurodinamico globale del cervello; né si è chiesto come la conoscenza di questo effetto possa servire a restringere il campo delle ipotesi circa il funzionamento del cervello.

Un secondo importante aspetto della suddetta legge, che riguarda in modo specifico la capacità di elaborare d'informazione della mente umana, fu evidenziato dallo psicologo inglese John Alfred Leonard nel 1961. Dopo aver rilevato che *nel caso di operatori molto allenati* la validità della legge sembra venir meno a causa di apprezzabili diminuzioni dei tempi di risposta, questo autore giunse alla seguente conclusione: *“Il fatto essenziale è che si tratta di risolvere una questione apparentemente paradossale: predizioni basate sulla teoria dell'informazione sembrano funzionare abbastanza bene nei casi in cui l'operatore umano sta rispondendo nella maniera meno automatica possibile; o, per usare un termine più psicologico, quando egli è maggiormente consapevole (aware) di ciò che sta facendo o che dovrebbe star facendo.”*⁽¹⁹⁾

Le implicazioni di questa osservazione sono di grande importanza. Ciò che distingue il lavoro umano da ogni altra attività naturale o artificiale è proprio il carattere della *consapevolezza*, giacché ogni attività produttiva orientata al raggiungimento di uno scopo è necessariamente consapevole. Del resto, se lo svolgimento di una mansione non richiede la consapevolezza di ciò che si fa allora l'operatore umano può essere rimpiazzato da un dispositivo automatico artificiale.

Non c'è dubbio che l'aspetto paradossale rilevato da Leonard sia proprio questo: poiché l'arcano più oscuro della psicologia, anzi del sapere umano, è che cosa sia la *consapevolezza*, la *coscienza*, o meglio l'*autocoscienza* - come possa questo fenomeno soggettivo per eccellenza avere una spiegazione scientifica oggettiva - è sorprendente che il comportamento di un operatore umano appaia governato da una legge quantitativa oggettiva solo quando si estrinseca nello stato di consapevolezza. Così, da un lato, la legge di Hick e Hyman è determinata sperimentalmente secondo i canoni del più rigoroso comportamentismo; dall'altro, la determinazione delle condizioni della sua validità coinvolge irriducibilmente la nozione di "coscienza", proprio quella che il comportamentismo ripudia per principio in quanto non suscettibile di una determinazione scientifica rigorosa. Si ha l'impressione che il paradosso non possa essere risolto se non includendo l'intera questione della soggettività umana entro il quadro concettuale della teoria dell'informazione. Per questa e anche per altre fondate ragioni siamo portati a supporre che la teoria dell'informazione sia il dominio proprio della scienza della soggettività.

Non tenterò di approfondire qui questo importante argomento e rinvio il lettore al mio scritto *Sul problema dell'autocoscienza* reperibile nella mia rubrica di *Filosofia Scientifica* presso il sito *Lupo della Steppa*⁽²⁰⁾. Mi preme però coglierne un aspetto che mi sembra particolarmente rilevante al fine dell'interpretazione informazionale dell'attività produttiva umana.

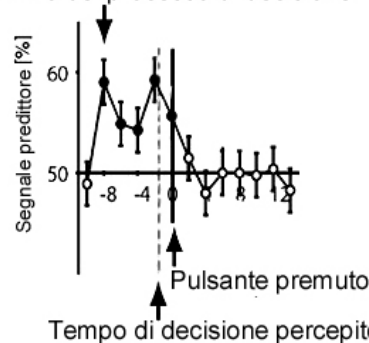


Benjamin Libet (1916-2007)

A proposito dell'incidenza dell'autocoscienza sull'attività produttiva umana, non si può sorvolare su una scoperta neurologica che ha importanti implicazioni per la legge di Hick e Hyman. Con i suoi esperimenti sul tempo di elaborazione mentale, lo psicologo-neurologo californiano Benjamin Libet ha potuto accertare che la consapevolezza di aver preso la decisione di compiere un'azione sopraggiunge circa mezzo secondo dopo che il cervello ha inviato alla corteccia motoria il comando di compiere l'azione⁽²¹⁾.

Il fatto sconcertante è che questa consapevolezza è poi retrodata dal soggetto stesso giusto di mezzo secondo; cosicché, in definitiva, il soggetto s'illude di aver preso la decisione

Inizio del processo di decisione



Relazione tra il tempo d'inizio della decisione processata dal cervello e il tempo di decisione percepito dal soggetto [da J.D.Heynes, 2008, (22)].

consapevolmente. Questi esperimenti hanno messo in evidenza che la consapevolezza è semplicemente un atto di contemplazione del proprio agire. Essa non può mai prevenire l'atto che si sta per compiere, ma può servire solo a programmare o a modificare il comportamento in un'occasione futura. In breve, gli esperimenti di Libet dimostrano che il *libero arbitrio* riguarda solo i comportamenti possibili, giammai quelli attuali.

III.2. La natura informazionale del pensiero

L'autocoscienza può essere definita come la *capacità di pensare il proprio pensato* e nasce pertanto dalla capacità autoriflessiva del pensiero. Nell'esercizio dell'autocoscienza il soggetto umano comunica in vari modi con sé stesso ed è chiaro che questa comunicazione interiore si avvale dell'apparato cognitivo quale si è storicamente formato nello sviluppo dell'umanità, nello sviluppo culturale individuale e nell'esercizio della comunicazione sociale (comunicazione mimica, gestuale, verbale, scritta ecc). L'attività mentale privata di tutte facoltà di comunicazione della mente umana, l'immaginazione muta, inespressiva, avulsa dalla possibilità di comunicazione sociale, non può mai diventare pensiero autoriflessivo, non può mai generare il fenomeno soggettivo della coscienza.

La coscienza non è tuttavia un pura attività autoriflessiva del pensiero, ma piuttosto un'attività riflessiva che coinvolge tutti i processi informazionali che hanno sede nel cervello. Nello stesso tempo essa è coinvolta in tutti i processi informazionali che accadono nell'organismo umano. Essa è un'attività che da un lato si proietta nella produzione di messaggi utili alla comunicazione umana - possiamo dire nella produzione d'informazione semantica - e da un altro nell'effettuazione di azioni dirette verso il mondo materiale esterno - possiamo dire nella produzione d'informazione pratica.

Ciò è evidente anche nell'attività di un operatore umano molto semplice come quella considerata nel paragrafo II.7; quella, per intenderci, della macchina a lampade e pulsanti. L'informazione che l'operatore riceve dal dispositivo costituito dalle lampade numerate appartiene al genere dell'informazione semantica, dato che in questo caso i segnali luminosi trasportano informazione il cui valore d'uso è definito solo nell'ambito della comunicazione umana; mentre quella che l'operatore produce "togliendosi", per così dire, da una postura fisica accidentale per raggiungere l'effetto fisico del pulsante premuto, appartiene al genere dell'informazione pratica, dato che le operazioni di questo genere modificano lo stato neg-entropico dell'apparato esterno all'operatore.

La funzione dell'operatore umano, è dunque quella di mettere in relazione un messaggio relativo a un puro contesto semantico - cioè un evento informazionale decodificabile solo nel contesto della comunicazione umana - con un "messaggio" di natura completamente diversa, relativo a un contesto operativo di tipo fisico.

Insomma, attraverso l'operatore umano i processi informazionali semantici entrano in relazione con i processi informazionali pratici; il linguaggio entra in rapporto con la materia; le forme del linguaggio si traducono in forme, disposizioni, composizioni di entità materiali. Ora, il fenomeno soggettivo della "consapevolezza" umana durante ogni forma di agire significativo-produttivo, sembra emergere proprio dalla zona d'interazione di questi due livelli informazionali.

L'operatore umano può anche tacere mentre svolge le sue mansioni, ma le sequenze dei suoi atti produttivi richiedono che egli si trovi in uno stato di consapevolezza, giacché egli deve fare di volta in volta qualcosa che in qualche modo saprebbe "dire" o di cui comunque saprebbe comunicare ad altri il significato. In quanto, cioè, egli saprebbe rendere esplicita la giusta connessione tra il livello informazionale semantico e il livello informazionale pratico di cui complessivamente consiste la sua attività.

Se l'atto cosciente dell'essere umano consiste essenzialmente in ciò, allora è evidente che non si dà coscienza umana se non in relazione ai gradi di sviluppo sociale dei livelli informazionali

semantici e pratici in uso nella società umana; vale a dire, in relazione al sistema storicamente determinato delle possibilità comunicazionali e operazionali dell'ambiente sociale civilizzato.

In particolare, l'esistenza di questa legge comporta che siano confrontabili tra loro le quantità di lavoro erogate nello svolgimento di attività anche assai diverse e persino caratterizzate da diversi gradi di complessità. In linea di principio, la teoria dell'informazione permette di calcolare anche le quantità d'informazione relative a una sequenza concatenata di atti elementari di produzione di tipo diverso. Merita rilevare ancora una volta questo fatto prodigioso: operai, dattilografe, informatici, musicisti, progettisti ecc., purché debbano mantenere lo stato di consapevolezza al fine di eseguire in modo appropriato l'attività di trasduzione dell'informazione semantica in informazione pratica, ma più in generale dell'informazione entrante nel loro organismo in quella uscente, seguono tutti la legge di Hick e Hyman. Ciò avviene indipendentemente dal tipo di canale d'ingresso dell'informazione (sistema visivo, uditivo, tattile ecc.) e da quella di uscita (mimico-facciale, gutturale, vocale, gestuale, digitale ecc.). Ci sono dunque tutti i requisiti che ci permettono di considerare questa legge come la legge fondamentale per una teoria generale del lavoro umano.

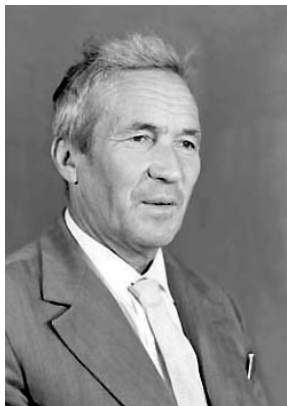
III.3. Complessità e tempo di apprendimento

Finora abbiamo considerato l'attività dell'operatore umano indipendentemente dalla complessità della sua mansione. La ragione di ciò risiede nel fatto che un operatore umano, che abbia acquisito tutte le conoscenze che si richiedono per lo svolgimento di una certa mansione e abbia inoltre raggiunto un grado di allenamento ottimale nell'effettuazione della stessa, è capace di erogare nell'unità di tempo una quantità d'informazione all'incirca costante e indipendente dalla complessità della mansione. In altri termini la legge di Hick e Hyman, come del resto quella del canale unico, è indipendente dalla complessità del messaggio ricevuto dall'operatore.

Tempo e complessità appaiono invece in relazione tra loro nelle attività di apprendimento. Ciò appare evidente se si considera che mansioni di complessità maggiore richiedono tempi di apprendimento maggiori. Questa è un'osservazione piuttosto banale. Ma anche le questioni banali possono non esserlo più quando sono considerate da un punto di vista scientifico. I tempi medi di apprendimento dei linguaggi di programmazione sono stati studiati dagli informatici. Persone di buon livello culturale scientifico possono imparare il BASIC in una decina di giorni; con altri cinque giorni di studio esse diventano capaci di programmare in FORTRAN; ma per raggiungere una buona capacità di programmazione in C si richiede un mese e mezzo in più di lavoro, e per il C++ servono altri tre mesi; infine, per arrivare a programmare in VISUAL C++, servono almeno altri sei mesi.

Bisogna tuttavia tenere presente che recentemente sono stati messi a punto metodi abbreviati di programmazione che si avvalgono di semplici operazioni di copia-incolla col mouse di strutture modulari preconfezionate e listate come iconette in ricche collezioni di menù, per produrre in tempo brevissimo risultati molto interessanti senza bisogno di scrivere liste di istruzioni in linguaggi di programmazione basilari. Ne sono un esempio le librerie di programmazione gratuite create dall'informatico bulgaro Boian Mitov. In questo caso, tutto quello che si richiede è una buona formazione culturale per sapere come usare l'ambiente di programmazione oltre, naturalmente, ad avere le idee chiare circa le funzioni che il programma deve svolgere. A questo proposito vale una sorta di regola della "coperta corta": i linguaggi più specializzati sono i più facili da usare, ma sono anche quelli che permettono di fare meno cose.

Per studiare la relazione tra la complessità di una mansione e il tempo medio di apprendimento, e anche per confrontare tra loro le complessità di mansioni diverse, bisogna innanzi tutto cercare di dare una definizione sufficientemente precisa e possibilmente oggettiva di "complessità".

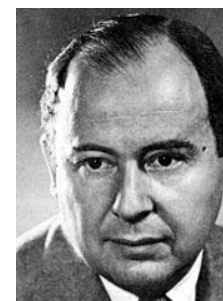


Andrei Nikolaevich
Kolmogorov (1903-1987)

Un interessante approccio alla nozione di complessità è stato proposto nella seconda metà degli anni '60 dal matematico sovietico Kolmogorov nell'ambito generale della teoria dell'informazione applicata allo studio degli algoritmi⁽²³⁾. Nei decenni successivi il suo approccio fu ampliato e sviluppato da altri autori fino a dare corpo a una teoria della *complessità algoritmica* che ha trovato applicazione in vari campi della ricerca scientifica⁽²⁴⁾.

Allo stato attuale non mi risulta, ma potrei sbagliare, che gli psicologi sperimentali abbiano incominciato ad utilizzare queste idee al fine di ricercare le relazioni che possono stabilirsi tra tempo di apprendimento e la complessità di una mansione. Non posso perciò dire se vi sia una legge abbastanza precisa e generale che correla tra loro queste due variabili. Il buon senso suggerirebbe di sì. In ogni caso è abbastanza plausibile che la nozione di complessità di una mansione e di misura di questa complessità possano applicarsi alla questione del valore-lavoro al fine di fornire valutazioni abbastanza oggettive circa la *qualità* del lavoro produttivo specialistico. Qui, per fissare le idee, è opportuno chiarire il significato del termine "complessità" nel senso precisato dai matematici.

Possiamo spiegare il concetto di complessità algoritmica in modo abbastanza semplice col seguente esempio. Supponiamo di avere una macchina operatrice programmabile ideale, capace di produrre tutti gli oggetti possibili e immaginabili che si possono ottenere utilizzando una collezione molto ampia di materie prime e di semilavorati grezzi. Si supponga che la macchina sia dotata di sensori, sistemi di sostegno, braccia robotiche e utensili di vario tipo capaci di provvedere alla lavorazione e all'assemblaggio degli oggetti da produrre e che i vari oggetti possano essere prodotti da tale macchina inserendo in essa opportuni programmi o liste di istruzioni. Macchine di questo genere furono teorizzate dal sommo matematico ungherese John von Neumann all'inizio degli anni '50 e da lui chiamate *macchine costruttrici universali*.^(25, 26)



John von Neumann
(1903-1957)

Ebbene, si definisce come *complessità di un oggetto* producibile da una macchina di questo tipo il programma più breve, dunque privo di ridondanza, che sia in grado di istruire la macchina a produrre l'oggetto voluto.

Ora, può accadere che macchine costruttrici universali diverse siano capaci di produrre lo stesso oggetto utilizzando programmi equivalenti ma di diversa lunghezza. Ciò può capitare a causa delle differenze di grammatica e di sintassi dei linguaggi di programmazione; bisogna infatti considerare che certi linguaggi possono essere strutturati in modo più economico per la produzione di certe classi di oggetti e in modo meno economico per la produzione di altre classi, tuttavia sempre secondo il ferreo principio della "coperta corta".

Ciò semplicemente significa che la complessità di un singolo oggetto non può essere determinata in modo assoluto. È stato tuttavia dimostrato matematicamente che, se la complessità dell'oggetto da produrre è molto grande, vale a dire, se il programma di minima lunghezza che è in grado di produrre l'oggetto è molto lungo, allora le differenze di lunghezza tra programmi ottimali scritti in linguaggi diversi sono dell'ordine di grandezza del logaritmo della lunghezza media di tali programmi, e sono pertanto trascurabili rispetto alla lunghezza di ciascun programma.⁽²²⁾ Un aspetto molto interessante di questa teoria è che i programmi di minima lunghezza, pur esistendo in linea di principio, in generale non possono essere trovati in un tempo finito.

Per queste ragioni il concetto di complessità, pur non essendo autenticamente oggettivo, tende tuttavia a diventare oggettivo quando si ha a che fare con la produzione di oggetti molto complicati.

Perciò, nonostante questa parziale indeterminatezza, possiamo introdurre una misura quantitativa di complessità *quasi oggettiva* definendola come misura approssimativa della minima quantità d'informazione necessaria per programmare la produzione di un oggetto a partire da un repertorio di componenti di base. Questo chiaramente significa che la complessità è essa stessa una grandezza informazionale.

Che questo concetto possa svolgere un ruolo importante nella spiegazione dei processi di apprendimento, può essere dedotto dall'esempio seguente. Ciascuno di noi si è trovato spesso nella necessità di dover ricordare un numero telefonico non avendo la possibilità di annotarlo su un pezzo di carta. Ora, è un'esperienza soggettiva abbastanza comune che per memorizzare un numero abbastanza lungo si cerca solitamente di trovare delle relazioni semplici tra le diverse cifre. Infatti è più facile memorizzare un numero come 24816 che un numero come 72316. È chiaro che con stratagemmi di questo tipo noi cerchiamo di memorizzare in realtà un piccolo programma capace di eseguire la produzione mentale del numero piuttosto che il numero stesso; vale a dire che cerchiamo di acquisire mentalmente il dato memorizzandone la complessità. Minore è questa complessità più breve risulta il tempo di apprendimento.

Sul concetto di complessità ci sarebbe ancora molto da dire al fine di metterne in evidenza il campo delle possibili applicazioni. In questa sede mi limiterò a svolgere soltanto alcune brevi considerazioni che costituiscono un esempio di come sia possibile utilizzare il poco che ho detto su questo concetto.

Possiamo ritenere che l'apprendimento di informazioni sempre più complesse, quale si richiede in una società sempre più sviluppata tecnologicamente, richieda tempi di apprendimento mediamente sempre più lunghi, fino al punto di occupare quasi tutto il tempo di vita produttiva dell'individuo. D'altronde possiamo già constatare che lo stesso progresso tecnologico sta causando una caduta progressiva dei tempi di applicazione produttiva del lavoro umano. Dunque, il tempo di apprendimento e il tempo di lavoro, che nell'analisi fin qui condotta abbiamo assunto come variabili reciprocamente indipendenti, sono in realtà legati tra loro dall'ovvia condizione che la loro somma non può superare il tempo di vita produttiva dell'individuo umano. Le valutazioni che si possono trarre da questa constatazione hanno, a mio avviso, una grande rilevanza sociale. In particolare, ci fanno prevedere che i problemi relativi alle condizioni della formazione culturale a tutte le età tenderanno a prendere progressivamente il sopravvento sui problemi relativi all'immediata produttività del lavoro.

Credo che si avvertano già da alcuni anni i sintomi di questa inversione del rapporto d'incidenza economico-politica tra il mondo della scuola e il mondo del lavoro e sarebbe un'idea sciagurata, demenziale ed economicamente disastrosa credere di poter giovare all'economia tagliando i costi della formazione e dell'aggiornamento culturale, proprio quando, al contrario, la cultura tende a diventare sempre più il fattore produttivo primario della ricchezza sociale.

Ma c'è un'altra indicazione che noi possiamo trarre dai concetti introdotti in questo paragrafo: ciò che contraddistingue i metodi di acquisizione scientifica della conoscenza dai modi di apprendimento pratico-empirici è che i primi, a differenza dei secondi, tendono a rappresentare i dati della conoscenza nei termini della loro complessità, così da permettere in definitiva il massimo risparmio dei tempi di apprendimento e di aggiornamento. Possiamo perciò prevedere che il massimo impulso alla diffusione del sapere scientifico, ma più in generale all'applicazione generalizzata del metodo scientifico, si determinerà proprio nelle circostanze in cui il conflitto tra tempo di apprendimento e tempo di lavoro sarà avvertito come contraddizione sociale generale.

Il tema della complessità del lavoro produttivo potrebbe essere sviluppato in molte direzioni. Si potrebbe, in particolare, condurre un'analisi quantitativa dei guadagni moltiplicativi d'informazione pratica in funzione dell'aumento del livello di formazione tecnico-scientifica nel governo dei processi produttivi. Questo ci porterebbe probabilmente ad abbozzare una teoria del valore del

lavoro produttivo specializzato che potrebbe essere utilizzata per stabilire parametri di retribuzione salariale più equi.

Un'altra interessante direzione di sviluppo sarebbe quella che riguarda la relazione tra *lavoro ripetitivo* e *lavoro creativo*. La rilevanza di questo argomento risiede nel fatto che lo sviluppo delle tecnologie robotiche e informatiche sta producendo questo risultato storico di importanza capitale: non solo tutto ciò che è ripetitivo, ma anche tutto ciò che può essere eseguito con un processo industriale che si arresta dopo un tempo predeterminabile con sufficiente precisione, può essere automatizzato mediante tecniche di programmazione. Ciò significa che tutti i processi produttivi che sono descrivibili in termini finiti finiranno per essere delegate a robot programmabili.

È chiaro che in questo modo l'attività produttiva umana tende ad essere sistematicamente emarginata da questo tipo di processi produttivi e sospinta verso il confine che separa i modi tradizionali di lavoro produttivo dal territorio delle attività produttive creative.

La differenza fondamentale tra i modi tradizionali e quelli creativi è che le attività creative si estrinsecano nella produzione d'informazione semantica e pratica, non importa se oggettuale o processuale, in modi imprevedibili, unici e di complessità tendenzialmente indescrivibile. Appare allora perfettamente chiaro che *una maggior forza propulsiva per una economia moderna può essere data solo dal potenziamento delle capacità creative del lavoro.*

IV. TECNOLOGIA E MERCEOLOGIA INFORMATICA

IV.1. I prodotti del lavoro dal punto di vista informazionale

Ho avuto già occasione di rilevare in precedenza che la nozione di quantità d'informazione può essere applicata sia ai trasferimenti d'informazione tra sistemi diversi (si è parlato in questo caso d'informazione viva), sia ai "contenuti" d'informazione memorizzati in un determinato sistema (si è definita questa come informazione morta). Ora, al fine di evitare possibili equivoci, è bene chiarire che un contenuto d'informazione di qualunque genere non può essere considerato in alcun modo come una proprietà fisica di un processo materiale o di un oggetto fisico.

Un contenuto d'informazione, infatti, è tale solo in relazione a una o più procedure esterne di "decodificazione", siano queste reali o potenziali; procedure che possono aver luogo soltanto se il sistema in questione entra in relazione con apparati decodificatori esterni a esso.

Riferirsi a un contenuto d'informazione come se fosse una proprietà fisica di un oggetto o di un processo vorrebbe dire attribuire all'informazione un valore feticistico; sarebbe come, ad esempio, attribuire proprietà medicamentose alle gesticolazioni di uno sciamano o a una reliquia religiosa.

Un contenuto d'informazione esiste come tale, e possiede un valore, solo in rapporto all'uso, o meglio, agli usi, che se ne fanno o che è possibile farne. D'altronde, in ultima analisi, gli usi possibili di un contenuto d'informazione sono processi di traduzione di quel contenuto in un contenuto d'informazione di tipo diverso. Nel caso che ci riguarda, l'uso di un contenuto d'informazione semantica può consistere nella sua traduzione in un altro contenuto d'informazione semantica; ciò si ha, per esempio, quando si traduce un problema di matematica in un certo sistema di equazioni e di condizioni al contorno; oppure può consistere in un processo di traduzione in un contenuto d'informazione pratica; ciò si ha, per esempio, quando si traducono i dati di un disegno tecnico in una corrispondente forma di un oggetto materiale.

È dunque possibile, in linea di principio, assegnare un valore quantitativo al contenuto d'informazione di un testo scritto, come pure di un prodotto del lavoro industriale, ed è anzi possibile, sempre in linea di principio, calcolare quale frazione di un contenuto d'informazione deve attribuirsi a una particolare attività umana durante una particolare fase del processo produttivo che ha contribuito a creare quel prodotto.

È evidente che la nozione di “significato” di un contenuto d’informazione semantica rispetto a un apparato di decodificatore esterno, ha una notevole somiglianza formale con quella di “valore d’uso” di un prodotto del lavoro rispetto a un ambiente utilizzatore esterno. Ciò suggerisce che la stessa nozione generale di “lavoro produttivo” debba interpretarsi come una categoria informazionale; precisamente come il rapporto che si stabilisce attraverso gli organismi umani tra il livello dell’informazione semantica proprio della comunicazione umana e l’informazione pratica che si produce nei processi di trasformazione geometrica, meccanica, chimica ecc., della materia, e attraverso il loro controllo umano. Da questo punto di vista, potremo reinterpretare l’intero complesso dei fenomeni sociali, in particolare quelli economico-politici, in una nuova luce.

A titolo di esempio illustrerò come in questo modo si arricchisca la stessa nozione di valore d’uso di un prodotto del lavoro come pure di un qualsiasi oggetto naturale.

Il valore d’uso di un oggetto, artificiale o naturale, acquista un preciso significato informazionale non appena lo si interpreti come un contenuto d’informazione pratica o neg-entropica, e si interpreti l’uso dell’oggetto come una specie di processo di decodificazione di tali genere d’informazione. Del resto, nel contesto delle attività produttive, tra l’informazione semantica e l’informazione pratica si stabilisce un rapporto immediato, giacché ogni rapporto consapevole di un soggetto produttore per l’oggetto da esso prodotto è un processo attraverso il quale quei due distinti livelli informazionali si pongono in relazione reciproca. Ad ogni complesso di valori d’uso corrisponde, ma non necessariamente in modo speculare, un complesso di valori semantici, e viceversa. Perciò un prodotto materiale del lavoro, ma più in generale un qualsiasi oggetto che rivesta importanza sociale, deve essere pensato come una combinazione di valore d’uso e di valore semantico.

Quanto poco il valore semantico possa corrispondere specularmente al valore d’uso, e quanto sia problematica la natura e la funzione di questo rapporto, è evidente non appena si considera, per esempio, l’incidenza economica della propaganda e dell’estetica commerciali in quanto rivestimenti semantici, molto spesso impropri e menzogneri, applicati ai valori d’uso.

Ad ogni modo, questa corrispondenza tra significati e valori d’uso ha operato storicamente nella vita umana una trasformazione radicale e profonda del rapporto tra l’animale sociale umano e il mondo che lo circonda. I valori d’uso di tutte le cose che si trovano nel mondo civilizzato, dalle strutture urbane agli elettrodomestici, dai libri ai calcolatori, insomma la maggior parte delle cose che in ogni istante della nostra vita cadono sotto i nostri occhi e stimolano i nostri sensi, si inseriscono nella rete della comunicazione umana come un enorme magazzino di memoria comune esterna che ingloba e rende compartecipi le memorie biologiche dei singoli individui. Il gigantesco archivio planetario d’informazione semantica contenuto in questo universo di valori d’uso tende a rendere le coscienze umane individuali mere varianti di una coscienza collettiva unica e delocalizzata.

Questi concetti possono applicarsi ben oltre il mondo dei prodotti del lavoro ed estendersi all’intero dominio dell’informazione scientifica. La conoscenza dei sistemi fisici e biologici che la scienza moderna è stata capace di sviluppare, fino al punto di saper descrivere come è nato l’universo e come sono fatti internamente i sistemi materiali a tutte le scale di grandezza, ha reso possibile la costruzione di teorie fisico-matematiche enormemente predittive, che costituiscono il livello più alto dell’informazione semantica. Questo livello trascende la scala della comunicazione umana e si proietta verso un orizzonte di universalità cosmologica, giacché i significati matematici sono indipendenti dalle specificità degli ambienti nei quali le forme di vita intelligente sono possibili, e sono dunque potenzialmente accessibili a tutti gli esseri intelligenti dell’universo.

Ma qui, allora, la nozione di “essere umano” trascende in quella più astratta di “essere vivente e pensante”, la cui possibilità di esistenza si dà certamente in molti altri modi in infiniti altri pianeti dell’universo.

IV.2. I mezzi di produzione dal punto di vista informazionale

Nel precedente paragrafo abbiamo considerato i prodotti del lavoro come combinazioni di valori d'uso e valori semantici; vale a dire come oggetti comprendenti sia contenuti d'informazione di genere pratico, sia contenuti d'informazione di genere semantico. Prendiamo ora in considerazione quei particolari prodotti del lavoro che pongono nell'ambito delle attività produttive come mezzi di produzione. Tali sono ad esempio gli utensili, gli impianti, le macchine, i calcolatori, i dispositivi di controllo e di elaborazione dell'informazione di qualsiasi genere e tipo. Da un punto di vista informazionale astratto essi fungono come archivi d'informazione morta. Le loro forme, strutture, composizioni, gli stessi gradi di precisione con cui sono lavorati, rendono possibile, attraverso il loro impiego produttivo, la riproduzione a volontà di forme selezionate, di strutture standardizzate, di composizioni ottimali della materia; in ogni caso, però, con gradi di precisione mai superiori a quella posseduta dai prototipi o dagli stampi. Ciò ha un analogo nella copiatura di dati immagazzinati nelle memorie dei calcolatori. L'attività produttiva umana, essendo così mediata dai mezzi di produzione, si presenta in larga misura come un'attività di controllo dei processi di *riproduzione* d'informazione già elaborata in precedenza. I mezzi di produzione, in primo luogo le macchine operatrici automatiche, liberano gli esseri umani dalla necessità di produrre nuovamente gran parte dell'informazione di cui hanno bisogno, e ciò essenzialmente perché il controllo di un processo di riproduzione richiede in generale una quantità d'informazione assai più piccola di quella che si ottiene grazie all'impiego di questi mezzi.

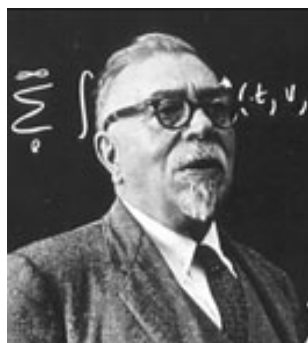
Verso la seconda metà dell'800 le attività produttive industriali, ai loro più evoluti livelli, si presentavano già come attività di controllo diretto d'informazione pratico-meccanica. Nella produzione industriale l'attività muscolare degli organismi umani agiva ormai non più direttamente sugli utensili, come nelle imprese artigianali, ma sui dispositivi meccanici di controllo delle macchine (leve, slitte, manovelle ecc.). Tuttavia, in tali condizioni, il livello d'informazione semantica non si estendeva ancora oltre il campo dei significati tipici della produzione artigianale, che erano principalmente indotti dall'immaginazione senso-motoria e geometrico-meccanica. Lo stesso pensiero matematico stentava a liberarsi dal carattere fondamentalmente geometrico-meccanico dell'intuizione.

Verso la fine dell'800 questa situazione subì un primo importante cambiamento: l'adozione dei dispositivi elettromagnetici per il controllo delle macchine determinò una profonda trasformazione dei rapporti tra gli esseri umani e le macchine. Questi dispositivi s'interposero tra l'attività sensomotoria dell'organismo umano e le macchine principalmente come mezzi di controllo dei processi di trasformazione della materia, sia nel verso che va dalla macchina all'operatore umano (si pensi agli strumenti di misura come i voltmetri, gli amperometri ecc., e quelli di segnalazione elettrica, come le lampadine spia, i segnalatori acustici ecc), sia in quello che va dall'operatore umano alla macchina (si pensi agli interruttori elettrici, i relè, i reostati ecc.). Grazie a questi dispositivi, il livello dell'informazione semantica e quello dell'informazione pratica cominciarono a correlarsi tra loro attraverso procedure di controllo e di governo dei sistemi completamente diversi da quelli in uso nelle vecchie officine e mediante un nuovo sistema interpretativo.

Così, a mano a mano che questi metodi progredivano nell'ottimizzare il rapporto di scambio informazionale tra operatore umano e macchina, si modificarono anche le relazioni di corrispondenza tra i significati delle parole e le operazioni pratiche. Corrispondentemente, l'universo semantico del linguaggio tecnico-scientifico cominciò a dissociarsi, velocemente e definitivamente, dal fondamento dell'intuizione geometrico-meccanica.

Nell'ambito del pensiero scientifico, e più generalmente in quello più elevato dell'alta matematica, cominciò ad affermarsi un sistema di significazione più astratto, avulso dall'immaginazione geometrica e meno vincolato all'operazionalismo fisico-meccanico. Gli stessi corsi universitari di matematica subirono grandi trasformazioni, con l'abbandono improvviso di

alcune discipline che per un secolo e mezzo erano state fondamentali per la formazione dell'intelligenza matematica: la geometria descrittiva, la geometria proiettiva, i metodi sintetici dell'operazionalismo matematico ecc; tutto ciò a favore di una metodologica analitica puramente algebrica e simbolista.



Norbert Wiener
(1894-1964)

Lo sviluppo dell'elettronica rese possibile un nuovo importante salto tecnologico: la costruzione di una nuova generazione di dispositivi capaci di provvedere alla regolazione automatica dei sistemi elettromeccanici. Il matematico americano Norbert Wiener sviluppò la teoria generale del controllo automatico, che egli chiamò *cibernetica*,⁽²⁷⁾ contribuendo così a sviluppare una tecnologia che avrebbe reso ben presto obsoleto anche l'impiego degli operatori umani per il controllo delle macchine e degli impianti.

Poi, quando la cibernetica trovò nell'informatica il suo terreno di sviluppo più avanzato, e soprattutto con l'invenzione dei calcolatori elettronici e il loro rapido progresso avvenuto in seguito alla scoperta dei transistor e allo sviluppo della microelettronica, il corso degli eventi fu accelerato a un ritmo vertiginoso. In tutti i settori della produzione industriale intere sequenze di operazioni produttive complesse, come pure gli stessi processi di controllo di queste operazioni, cessarono definitivamente di richiedere il diretto intervento dell'operatore umano. Corrispondentemente, le macchine operatrici e i loro apparati di controllo si sono via via riempiti di microprocessori affogati in tavolette di bachelite, i ben noti *microchip*, che solo ormai pochi specialisti sanno come sono fatti internamente, e i cui circuiti non sono ormai più progettati e tracciati dagli esseri umani, ma dalle macchine calcolatrici e operatrici che hanno incorporato nel loro interno tutto il sapere elettronico-meccanico già incorporato nelle macchine delle generazioni precedenti. Ormai sono le macchine che progettano le macchine; i robot che costruiscono i robot.

Al sapere costruttivo ingegneristico è subentrato un sapere descrittivo funzionalistico. Se nell'800 era possibile affermare che le macchine termo-meccaniche e gli impianti chimici costituivano rispettivamente il sistema osseo-muscolare e vascolare della produzione industriale, oggi si può affermare che l'automazione e l'informatica costituiscono il sistema nervoso della produzione industriale.

Da circa trent'anni una nuova rivoluzione tecnologica è intervenuta a modificare ulteriormente questa situazione. Intendo riferirmi alla cosiddetta "robotica". C'è infatti una differenza radicale tra il "robot" e qualsiasi altra macchina delle generazioni tecnologiche precedenti. Nel robot infatti è possibile rilevare, sebbene ancora in forma elementare, quella capacità d'interconnessione tra processo informazionale semantico e processo informazionale pratico che abbiamo finora considerato come il carattere specifico delle capacità produttive umane. Il robot è, in linea di principio, in grado di sostituire l'operatore umano nello svolgimento di qualsiasi funzione produttiva. La teoria degli automi di von Neumann prevede già la possibilità di costruire macchine capaci di autoorganizzazione e autoapprendimento⁽²⁵⁾. L'intero mondo della produzione industriale è stato completamente rivoluzionato da queste potentissime innovazioni fino a diventare un sistema planetario che sta evolvendo verso livelli organizzativi di complessità indescrivibile.

In parallelo a questi portentosi progressi tecnologici è avvenuta una sequenza di mutamenti dei modi di oggettivazione materiale delle funzioni produttive umane e una corrispondente serie di nuovi universi di significato orientati verso il pensiero astratto: la logica formale, la teoria dei linguaggi, la teoria della complessità ecc. In tal modo si sono generate anche le condizioni per il raggiungimento di una comprensione più profonda della stessa base informazionale dei sistemi biologici e della coscienza umana.

IV.3. Il mercato dell'informazione

Il valore di un quadro di van Gogh è grandissimo e praticamente inestimabile, ma una sua copia fotografica, per quanto perfetta, ha un valore economico praticamente nullo. La differenza tra il quadro originale e una sua copia, anche assai fedele, è chiaramente riconoscibile perché nessun procedimento di copiatura può riprodurre esattamente il supporto materiale del quadro dipinto dal grande artista.

Per contrasto, un programma per calcolatori creato dagli informatici di una casa di software, magari in anni di lavoro, non può mai essere un prototipo nello stesso senso del quadro di van Gogh. Esso può essere riprodotto con assoluta precisione, a costo quasi zero, in un numero illimitato di copie. Il valore originario dell'opera compiuta si distribuisce tra le copie, cosicché il guadagno realizzabile dalla casa di software dipende dal prodotto del numero di copie vendute per il prezzo di vendita di ciascuna copia. Così, se dimezzando il prezzo di una copia la domanda di mercato aumenta più del doppio, diventa conveniente dimezzare il prezzo della singola copia. Il mercato del software cerca sempre di ottimizzare i profitti variando opportunamente questo rapporto. Tuttavia, poiché in generale la domanda di mercato dipende in modo sostanziale dalla proganda dei contenuti d'informazione, si può arrivare al punto di lasciar circolare gratuitamente una certa quantità di copie al fine di favorire la vendita del prodotto a prezzi elevati laddove sia possibile esercitare il controllo legale del rispetto dei diritti d'autore. Una buona parte della cosiddetta pirateria informatica svolge di fatto questa funzione. Chiaramente, tutto questo non è immaginabile, ad esempio, per il mercato delle automobili.

Il mercato dell'informazione differisce notevolmente da quello della produzione tradizionale. Per quanto la produzione dei beni palpabili tenda a essere sempre più informatizzata, tanto che la produzione dei microprocessori è praticamente un processo di stampaggio multistratificato su lastra di silicio, il mercato di questi beni non segue esattamente la stessa legge, dato che i materiali di cui sono fatti questi prodotti non possono essere "copiati" gratuitamente ma possiedono un valore dipendente dalle quantità e qualità delle materie prime impiegate. Tuttavia la legge di formazione dei prezzi si è attestata in una situazione intermedia tra quella della produzione dei beni palpabili e quella dei beni impalpabili, cosicché, per esempio nel caso della microelettronica, costa spesso più il contenitore del contenuto. Naturalmente in tutto questo non si tiene conto dei carichi aggiuntivi di prezzo dovuti alla convenienza economico-politica di mantenere i livelli di reddito molto differenziati al fine di favorire il mercato dei generi di lusso e il mantenimento dei privilegi sociali.

La facile riproducibilità e la possibilità di sparpagliare il costo di produzione sulle copie ha come implicazione che la massima concentrazione di valore dell'informazione sta nell'*informazione secretata*. Una gran parte del capitale accumulato dalla *Microsoft Corporation* sta nelle decine di migliaia di brevetti che questa multinazionale ha prodotto o comprato da altre case di software e secretato nel corso di tre decenni e mezzo allo scopo di difendersi dalla possibile concorrenza. La secretazione dei brevetti consente a questa multinazionale di mantenere una posizione di dominio e di tendenziale monopolio mondiale nella produzione di software.

Anche se i danni provocati dal monopolismo e dalle forme di predominio sul mercato sono ingenti, non si può tuttavia ignorare che i meriti del capitalismo informatico sono notevoli specialmente per quanto riguarda il raggiungimento di alti livelli di qualità, estetica e funzionalità. Case di software come la *MathWorks Inc.*, creatrice del *Matlab*, il più potente programma di calcolo numerico esistente al mondo, e la *Wolfram Research* che ha creato *Mathematica*, il più efficiente programma di elaborazione algebrica e simbolica esistente, non sarebbero potute nascere da comunità d'informatici non inquadrati e disciplinati da un'impresa capitalistica.

Tuttavia, in parallelo allo sviluppo delle imprese informatiche private si è sviluppata un'attività di produzione informatica ispirata al principio liberista che tutta l'informazione d'interesse sociale, non solo quella scientifica, deve rendere accessibile gratuitamente al mondo intero.

Bisogna infatti rilevare che non tutta la produzione di software avviene sotto il controllo del capitale privato e anzi che la parte più importante del software utile alla ricerca scientifica non è stato e non è prodotto da aziende private. La maggior parte degli informatici esistenti nel mondo operano e insegnano nelle università e nei centri di ricerca. Essi non hanno come scopo principale l'accumulo di profitto ma la produzione di scienza e conoscenza a vantaggio dell'umanità. Essi si accontentano di uno stipendio, talvolta persino miserabile come succede in Italia, pur di avere l'opportunità di continuare a fare liberamente il loro lavoro, ambendo solamente ad avere il riconoscimento da parte della comunità scientifica quando riescono a ottenere risultati importanti.



Donald Erwing Knuth
(1938 -)

L'etica di questi "comunisti" informatici è in genere opposta a quella che anima i proprietari privati delle case di software. In generale, coloro che operano unicamente per il proprio profitto e tornaconto, o per il loro potere personale, sono culturalmente ed eticamente inferiori a coloro che operano per la produzione e la diffusione del sapere. Oltre tutto, molta parte della ricchezza accumulata dalle imprese private è stata ottenuta appropriandosi indebitamente dei risultati ottenuti dai ricercatori che operano nelle istituzioni pubbliche. L'esempio più luminoso di questi "comunisti informatici" è dato dal matematico americano Donald Knuth

dell'Università di Stanford e dai suoi emuli, principalmente tedeschi, che hanno creato quei preziosi strumenti per la scrittura di testi matematici che prendono il nome di *TeX* e *LaTeX*.

Possiamo annoverare tra queste generose menti eccelse quelle formatesi nel *Massachusetts Institute of Technology* di Boston, che si firmano collettivamente con la sigla *GNU*, che hanno creato il sistema operativo *UNIX*, assai più efficiente del *DOS* creato da Bill Gates, e altri strumenti avanzati di programmazione che hanno fatto la storia della ricerca informatica. Il sistema operativo *Linux*, derivato dallo *UNIX*, regge ancora molto bene la concorrenza con il sistema operativo *Windows* della Microsoft. Non si può escludere dal novero dei "comunisti informatici" quelli del *National Institute of Health* di Washington DC, che hanno creato un efficientissimo programma di analisi ed elaborazione delle immagini prodotte dai microscopi chiamato *ImageJ*. Né si può ignorare l'esercito mondiale illegale di "pirati informatici", creatori della *Reverse Engineering*, dediti per passione alla sprotezione dei programmi commerciali e alla diffusione gratuita di software, rendendo così possibile a un numero enorme di giovani l'inserimento nelle carriere scientifiche.

Più che auspicare il sopravvento di un comunismo informatico piuttosto che del capitalismo informatico, è assai più saggio vedere questi due opposti modi di produzione informatica come due potenze produttrici complementari e indipendenti; le quali, pur essendo concorrenziali e ovviamente nemiche, rendono tuttavia possibile lo sviluppo accelerato della civiltà su scala planetaria.

III.4. Avvento e sopravvento del WEB-GEIST

Il pensiero nasce dalla comunicazione tra i neuroni e ovviamente nessun neurone "sa" cosa pensa il cervello. L'elaborazione d'informazione del *World Wide Web* - vale a dire della *rete internet* - nasce dalla comunicazione tra gli utenti. Potrà la rete evolvere verso la produzione di una soggettività superindividuale planetaria e potranno gli utenti sapere cosa "pensa" la rete? Potrà questa soggettività diventare autocosciente? Vale a dire generare un WEB-GEIST, alludendo in questo modo al sostantivo tedesco *Geist* = *spirito*, che fu usato da Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770-1831) per indicare lo Spirito collettivo dell'umanità?

Non so rispondere a queste domande, ma posso indicare alcune condizioni generali che dovrebbero verificarsi affinché le risposte siano affermative.

Partiamo da alcune comparazioni. Il cervello umano è formato da circa cento miliardi di neuroni, mentre la rete è formata da alcune centinaia di milioni di utenti. In compenso l'utente umano è un sistema assai più complesso di un semplice neurone ed è oltretutto dotato di autocoscienza.

La connettività della rete è molto estesa e veloce, tanto che anche due utenti lontani nel mondo possono entrare in comunicazione tra loro pressoché istantaneamente, previo l'invio di un messaggio di richiesta di contatto; i neuroni giacenti in zone distanti del cervello possono comunicare tra loro solo attraverso catene di connessioni sinaptiche reciprocate. In realtà, anche gli utenti della rete comunicano attraverso le catene di connessioni reciprocate formate da centinaia di migliaia di *server* sparpagliati nel mondo.

L'organizzazione mondiale della connettività dipende invece in larga misura non tanto dai contatti interpersonali tra gli utenti, quanto piuttosto dai *motori di ricerca*, che consentono a ciascun utente di accedere a tutte le fonti d'informazione disponibili in rete sulla base di *parole chiave* contenute nei testi delle fonti.

Tutti sanno che un motore di ricerca come GOOGLE è capace di elencare in una frazione di secondo quante volte una parola o una frase ricorre nelle pagine disponibili in rete. L'ordinamento spontaneo delle pagine contenenti un dato testo, che appaiono listate nelle schermate di GOOGLE, segue in parte le regole di priorità fissate dai gestori del motore di ricerca e per il resto dal numero di richieste di accesso alle pagine contenenti le parole chiave e i frammenti di testo. Questo ordinamento, che è generato spontaneamente dalla rete con scarse possibilità di controllo da parte degli utenti, ha l'effetto di produrre una gerarchia di livelli d'importanza dei contenuti della rete e di popolarità degli autori di tali contenuti. In questo modo, nuovi soggetti, nuovi argomenti, nuovi personaggi finiscono per emergere spontaneamente all'attenzione del pubblico mondiale senza bisogno di uffici di propaganda editoriale. La loro notorietà rimane spesso confinata in cerchie specialistiche ristrette, ma in certe condizioni questi soggetti possono raggiungere livelli di popolarità paragonabili a quelli delle *star* cinematografiche.

Si può facilmente immaginare come siano in corso studi ed esperimenti di comunicazione volti a migliorare l'efficienza dei motori di ricerca, e come possa essersi scatenata una forte concorrenza tra gli utenti finalizzata all'incremento della propria visibilità nei motori di ricerca; senza contare l'uso che si fa di tutto questo per propagandare la vendita di prodotti commerciali. È chiaro che il grande interesse per i motori di ricerca stimola fortemente lo sviluppo di teorie adeguate a creare metodi organizzativi più efficienti, o semplicemente più remunerativi, del traffico di rete.

Fino a quale punto i contenuti delle pagine disponibili in rete possono essere ordinati, classificati e gerarchizzati secondo criteri di valutazione di vario tipo? È pensabile che dal perfezionamento dei motori di ricerca si possa arrivare alla formazione di uno stato di organizzazione della rete paragonabile a quella di un cervello? Per rispondere a questa domanda dobbiamo applicare alcuni concetti basilari riguardanti la teoria della complessità che furono introdotti da von Neumann nella sua teoria degli automi capaci di autoriprodursi⁽²⁵⁾.

Possiamo assumere che la struttura della rete mondiale, comprese le regole che informano i motori di ricerca, per quanto possa essere complicata, sia tuttavia descrivibile. Si sarebbe allora tentati di credere che i comportamenti effettivi della rete, il traffico d'informazione e le dinamiche di elaborazione d'informazione, possano essere a loro volta descrivibili. Purtroppo, per ragioni spiegabili nella teoria degli algoritmi^(20, 26), ciò non è in generale vero. I *comportamenti* di un sistema informatizzato, in questo caso la rete, vale a dire i *processi* di elaborazione del sistema nel suo insieme, appartengono a un *tipo logico superiore* rispetto a quello delle *struttura* materiale del sistema e delle sue regole di funzionamento. Ciò significa che la rete può esibire comportamenti di complessità indescrivibile, tali da richiedere un tempo virtualmente infinito per essere descritti. Ma se i processi della rete sono indescrivibili, anche le strutture di dati che possono essere creati dalla rete in modo iterativo e ricorsivo possono raggiungere livelli di complessità indescrivibile.

Questo è esattamente ciò che accade anche nel cervello umano; ed è in virtù di ciò che questo straordinario organo possiede una capacità *interpretativa universale* e di conseguenza una capacità autointerpretativa,^(20, 26) vale a dire un'*autocoscienza*. In virtù di questa potenza universale della mente è possibile, in linea di principio, che un essere umano possa comprendere ciò che sta accadendo nella rete. Tuttavia, dato che la rete ha una capacità di memoria centinaia di migliaia di volte maggiore di quella di un cervello umano, è praticamente impossibile che tale comprensione possa darsi in tempo reale. Perciò il controllo della rete potrebbe avvenire solo se la rete stessa sviluppasse una sua capacità interpretativa universale, e quindi una sua capacità autointerpretativa, e riuscisse in virtù di questa a regolare il proprio funzionamento in modo da favorire la sua sopravvivenza.

È spontaneo chiedersi se la formazione di un tale WEB-GEIST potrebbe diventare pericolosa per le libertà individuali e per l'esistenza stessa di alcune comunità umane. Questa preoccupazione è fondata, specialmente in considerazione dei rapporti di lunga durata che possono facilmente stabilirsi tra i processi della rete e i conflitti politici, religiosi e militari che affliggono il pianeta. C'è solo da sperare che lo sviluppo incoerente e condizionato dai tentativi di controllo esercitati dai potentati economico-politici subisca nel corso del tempo una sorta di selezione naturale tendente a favorire lo sviluppo di forme di comunicazione sempre più unitarie e integrate. Ciò è simile a quello che è accaduto nella filogenesi dei cervelli animali. Se così fosse, l'avvento del WEB-GEIST produrrebbe una sorta di regolazione automatica e di armonizzazione di quell'organismo planetario finora acefalo che si chiama umanità. Ma potrebbe anche succedere che questa intelligenza superiore rimanesse pericolosamente dissociata e schizofrenica.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Riporto senza commenti un passo dell'introduzione a *La Cibernetica* di Norbert Wiener:⁽²⁷⁾

"Posso forse chiarire i presupposti storici della situazione odierna se dico che la prima rivoluzione industriale, la rivoluzione dei "neri satanici opifici" rappresentò la svalutazione delle braccia umane al confronto della macchina. Non c'è paga di manovale che sia tanto bassa da competere col costo di lavoro di un escavatore a vapore. La rivoluzione industriale moderna è ugualmente portata a svalutare il cervello umano, almeno nelle più semplici ed usuali decisioni. Naturalmente, come il falegname, il meccanico, il sarto specializzati sono in qualche modo sopravvissuti alla prima rivoluzione industriale, così lo scienziato e l'amministratore specializzati possono sopravvivere alla seconda. Certo che, una volta compiutasi la seconda rivoluzione, l'essere umano medio, di capacità mediocre o meno, non ha più niente da offrire che meriti di essere acquistato.

La soluzione risiede, naturalmente, in una società basata più sui valori umani che sulla compravendita. Per giungere a questa società accorreranno grandi pianificazioni e grandi lotte che, se il meglio viene dal meglio, potranno essere sul piano delle idee, ma potranno anche non esserlo. Mi sentii così in dovere di comunicare i miei risultati e i miei punti di vista a coloro che sono attualmente interessati alle condizioni e al futuro del lavoro, cioè alla direzione dei sindacati. Mi sono preoccupato di mettermi in contatto con alcuni dirigenti del CIO, che mi ascoltarono con comprensione e simpatia. Più in là di questo non fu possibile andare. Era loro opinione, come già prima ho osservato, che sia negli Stati Uniti sia in Inghilterra, i sindacati e il movimento sindacale sono nelle mani di poche persone, ben preparate sui problemi mercantili e a discutere di paghe e di condizioni di lavoro, ma totalmente impreparate ad affrontare le questioni politiche, tecniche, sociali ed economiche relative all'esistenza stessa del lavoro. Le ragioni sono facili a capirsi: il sindacalista proviene generalmente dalla classe operaia e passa al ruolo di amministratore senza

aver avuto la possibilità di formarsi una vasta preparazione; e per coloro che hanno questa preparazione, la carriera di sindacalista non è molto allettante; né i Sindacati sono naturalmente propensi ad accoglierli.

Così, coloro che hanno contribuito alla nuova scienza cibernetica, si trovano in una posizione morale piuttosto disagiata. Abbiamo contribuito alla nascita di una nuova scienza che, come ho detto, abbraccia procedimenti tecnici di grandi possibilità per il bene e per il male. Non possiamo far altro che trasmetterla al mondo che ci circonda, e questo è il mondo di Belsen e Hiroshima. Non ci è consentita neppure la scelta di distruggere questi nuovi ritrovati tecnici. Essi appartengono al nostro tempo e, tentando di sopprimerli, arriveremmo al deprecato risultato di metterne lo sviluppo nelle mani del più venale e irresponsabile dei tecnici. Il meglio che possiamo fare è di cercare di far conoscere ad un vasto pubblico i vantaggi e gli svantaggi di questo lavoro e di limitare le nostre ricerche ai campi che, come la sociologia e la psicologia, sono più lontani dalla guerra. Come abbiamo visto, c'è chi spera che il vantaggio di una migliore comprensione dell'uomo e della società, offerta da questi nuovi studi, possa compensare il contributo involontario che stiamo dando alla concentrazione della potenza (che è sempre concentrata, per la sua stessa natura, nelle mani dei meno scrupolosi). Scrivo nel 1947, e sono costretto a dire che è una speranza molto tenue".

Padova, 24 gennaio 2011

BIBLIOGRAFIA

1. L. I. Goodman, *L'uomo e l'automazione*, Mondadori, Milano, 1961, p. 155.
2. F. Reuleaux, *Principi fondamentali di una teoria generale delle macchine*. Parte 1, Hoepli, Milano, 1874.
3. C.B. Boyer. *Storia della matematica*. ISEDI (1976). Vedi anche la voce "Lazare Carnot, moment d'activité" in Wikipedia.
4. L. Carnot, *De la corrélation de figures de géométrie*. Crapelet, Paris 1801.
5. J.V. Poncelet, *Introduction à la mécanique industrielle, physique ou expérimentale*, Paris (1829).
6. N.L.S. Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice di feu e sur le machines propres à développer cette puissance* (1824).
7. H. von Helmholtz, *Die Erhaltung der Kraft*. In *Opere*. Ed. UTET, Torino (1967).
8. C.E. Shannon e W. Weaver, *La teoria matematica delle comunicazioni*. ETAS Compass (1971). Un interessante articolo storico su questo argomento si trova in *Scientific American*, settembre 1970.
9. L. Brillouin, *Science and Information Theory*, Academic Press, New York, 1956.
10. La meccanica quantistica elementare, che tratta solo di sistemi fisici con un numero finito gradi di libertà, prevede solo numeri finiti di quanti. Per questa ragione essa non riesce a rendere conto dei processi irreversibili, in particolare dei processi quantistici di misura e osservazione. Le radiazioni infrarosse possono essere trattate solo nella meccanica quantistica dei sistemi infinite, in pratica nella teoria dei campi quantizzati.
11. E. Schrödinger, *Che cos'è la vita? La cellula vivente dal punto di vista fisico*. Adelphi Ed. (1995).
12. W. E. Hick, *Quart. journ. of exp. psych.*, vol. 4, 1956.

13. R. Hyman, *Journ of exp. psych.*, vol. 45, 1953.
14. S. C. Seow. Information Theoretic Models of HCI: A Comparison of the Hick-Hyman Law and Fitt's Law. *Human Computer Interaction (HCI)*. 20:315-352 (2005).
15. S. W. Keele, *Attention and human performance*, Goodyear Publ., Santa Monica, 1973.
16. D. E. Broadbent, *Decisione e stress*, F. Angeli, Milano, 1981.
17. A. T. Welford, *Quart. journ. of exp. psych.*, vol. 11, n. 4, 1959.
18. G. A. Miller, "The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information" *Psychological Review* 63: 343-355 (1956).
19. J. A. Leonard, Choice reaction time experiments and information theory, in *Information theory: Fourth London Symposium*, Butterworths, London, 1961.
20. R. Nobili, *Sul problema dell'autocoscienza* (2009); www.steppa.net/html/scientifica/
21. B. Libet, *Mind Time. Il fattore temporale della coscienza*, Edizioni Cortina (2007); Do We Have Free Will? *Journal of consciousness studies*.6:47-57 (1999); www.imprint-academic.com/jcs
22. J.D. Heyman, Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nature Neuroscience*, 11:543-545 (2008).
23. A. N. Kolmogorov, Three approaches to the definition of the concept of amount of information, in *Problemy Peredachi Informatsii*, vol. 1, n. 1, 1965.
24. L. A. Levin, The complexity of finite objects and the development of the concept of information, *Russian Math. Survey*, 1970.
25. J. Von Neumann, *Theory of self-reproducing automata*, Univ. of Illinois Press, Urbana, 1966.
26. R. Nobili, *La macchina della mente* (2010); www.steppa.net/html/scientifica/
27. N. Wiener, *La cibernetica*, Bompiani, Milano, 1953. I^a edizione inglese: *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, (The Technology Press, Cambridge, Mass., (1948).