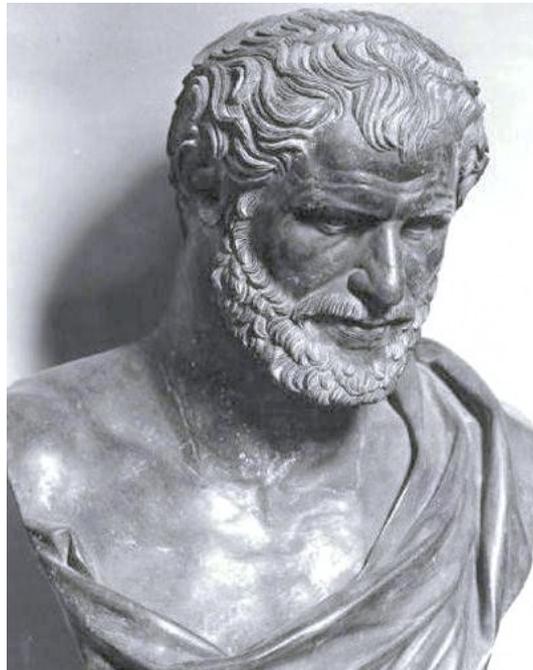


# ANTEPRIMA

Copertina del libro: fronte.

Sergio Beva



## Meccanica Cerebrale



È un po' un prototipo funzionante  
di un sistema di visione  
artificiale human like,  
un po' un modello del cervello umano.

Copertina del libro: retro.

In questo libro propongo il progetto di un cervello artificiale, che vuole imitare quello umano. Esso si incardina sulla neurofisiologia e sulla psicofisica e si sviluppa entro il solco del meccanicismo classico. Il titolo e l'immagine di copertina non lasciano dubbi in merito.

Nel volume si discuterà:

- come il coacervo di eccitazioni elettriche che si produce nel cervello quando si osserva il mondo, possa essere interpretato come l'immagine del mondo stesso;
- come possa avvenire il riconoscimento dell'immagine; come l'uomo possa muoversi nell'ambiente;
- come si formino il linguaggio e le varie grammatiche.

Ho simulato sul computer parte dei processi visivi umani, quelli che non comportano il movimento; il resto deve considerarsi come teoria ipotetica.

*Da pag. 3 a pag. 12.*

*Per essere creativi dobbiamo essere leggermente disoccupati, in modo da dare via libera all'elaborazione del nostro pensiero.*

*Ai miei genitori, a cui dovetti tanta libertà.*

## **Prefazione**

Le frasi con cui inizia questo libro sono frasi di James Watson, co-scopritore del DNA e di Silvio Ceccato, estroso uomo di pensiero, che portò in Italia la cibernetica. La prima descrive il mio stile di vita, che è stato possibile grazie ai miei genitori, a cui il libro è dedicato. Esso vuole essere un modesto passo verso l'ambizioso scopo di comprendere il funzionamento del cervello, perlomeno nelle sue attività razionali, attraverso la sua meccanizzazione.

Chi per primo ha riconosciuto che il cervello fosse il centro dell'attività pensante di uomini e animali fu Alcmeone di Crotona. Di lui ci sono notizie incerte, anche sulla sua data di nascita: Aristotele dice che Alcmeone era giovane quando Pitagora era già vecchio. Pare che egli abbia dissezionato animali e visto i nervi che dagli occhi, dalle orecchie e dalla lingua andavano al cervello. Prima di lui, ma anche secoli dopo, perché il Nostro non convinse tutti, la sede delle attività cognitive era posta nel cuore e il cervello era considerato un organo irrilevante: gli egizi non conservavano quello delle mummie e lo stesso Aristotele credeva servisse a raffreddare il sangue. Come ogni altra scienza, lo studio del cervello fiorì soprattutto nel secolo scorso, grazie a scoperte nella microscopia, nella chimica e nella rilevazione di correnti elettriche in una branca scientifica chiamata fisiologia. Vi furono poi gli psicologi che studiarono i comportamenti degli umani e degli animali mettendoli in relazione con il cervello. Subito dopo la seconda guerra mondiale, soprattutto negli Stati Uniti d'America, si pensò di simulare il cervello sui calcolatori elettronici, che si era appena riusciti a costruire. I calcolatori accesero l'entusiasmo di molti, si giunse a paragonarli al cervello e a chiamarli cervelli elettronici. Lo studio del cervello o i tentativi di simulare il suo comportamento proseguono con grande intensità. Lascio al lettore giudicare se i progressi nell'intelligenza artificiale siano dovuti a scoperte concettuali o non piuttosto all'aumentata potenza di calcolatori. Utilmente o invano, finanziamenti in tale direzione ve ne sono stati e ve ne sono tantissimi. Ultimi, (2013), quelli che in dieci anni erogheranno circa 1.300.000.000 euro: sono due progetti enormi, il primo della comunità europea l'Human brain project e il secondo degli USA, la BRAIN initiative.

Io ho sempre studiato da solo, sono un autodidatta ed ho cominciato a interessarmi del funzionamento cerebrale quando avevo 19 anni. L'ho fatto per puro interesse intellettuale, un tempo si sarebbe detto "per amore della scienza" e siccome ero interessato a proseguire gli studi in assoluta libertà me li sono sempre pagati, comprese le strumentazioni necessarie. Non voglio però tediare il lettore con la mia storia personale, che è quella di un uomo assolutamente ordinario. Alla base del mio lavoro vi è l'idea che il cervello sia un apparato che permetta all'essere vivente di destreggiarsi nel suo ambiente, prevedendo lo sviluppo delle situazioni onde ricavare dei benefici o evitare dei danni. Questo in accordo con le teorie evoluzionistiche di Darwin e Wallace. Il mio lavoro risente anche del pensiero di Democrito e pesantemente di quello di David Hume, esso è legato al cervello e al suo funzionamento attraverso la neurofisiologia e la psicofisica. Il modello di cervello che ho sviluppato vuole essere, per quanto possibile, "human like". Fin dove mi è stato possibile e questo è avvenuto per la parte della percezione visiva, ho costantemente verificato le teorie che andavo formulando con dei programmi che funzionano su qualunque PC. Poiché in questo scritto compaiono anche teorizzazioni sul linguaggio avviso che esse non sono state sperimentate. Questo non è un libro di filosofia o di psicologia ma è sostanzialmente un libro di fisica. In effetti si può tracciare un parallelo fra lo studio dell'atomo e quello del cervello: nei primi anni del Novecento i fisici perfezionarono l'idea di atomo, intuiva dai chimici ottocenteschi, basandosi su esperimenti di diffusione di certe radiazioni da parte della materia e dalla luce che la materia emetteva emetteva

quando era riscaldata. Nessuno aveva o ha mai visto un atomo e su esso, come sulla fisica dell'estremamente piccolo, tuttora non si hanno le idee chiare e, a mio avviso, non si avranno mai. Similmente all'atomo anche il cervello si può capire attraverso la manifestazione delle sue attività con test psicologici e anche con esperimenti neurofisiologici. Diversamente dall'atomo penso che il cervello si possa comprendere perché i suoi costituenti, neuroni, sinapsi,... non fanno parte del microcosmo, come la materia atomica e subatomica, anzi il cervello si può pure mappare; infatti possediamo già la mappa dettagliata del modesto cervello di un verme, costituito da un migliaio di neuroni, senza tuttavia riuscire ancora ad intenderne il suo funzionamento. Il mio studio inizia dalla percezione (uso questa parola, per quanto essa sia maldefinita), perché gli animali riescono a sopravvivere e a destreggiarsi nel loro ambiente senza possedere un linguaggio strutturato e quindi è con la percezione che il cervello svolge questo compito. Il linguaggio strutturato è un costrutto ulteriore, proprio dell'uomo, che permette dei miglioramenti nell'attività predittiva del cervello ma sempre sulla base della percezione. Siccome, almeno nell'uomo, la visione è la percezione più importante, per capire il cervello umano occorre, per prima cosa, capire come funziona il sistema visivo, che riflettendo sull'evoluzione, appare avere, nell'uomo e negli animali superiori, due funzioni diverse: la prima quella di permettere di orientarsi nello spazio e la seconda quella di riconoscere gli oggetti. Se pensiamo alla mosca i suoi occhi sembrano avere solo la prima funzione, essa riconosce il cibo con l'olfatto, o per meglio dire, con l'apparato chemiosensoriale. Nei bassi vertebrati, l'area cerebrale dedicata all'apparato chemiosensoriale è ancora vastissima e anche loro riconoscono gli oggetti soprattutto dagli odori e dai sapori. Nell'uomo non è più così: gli odori e i sapori hanno importanza marginale nel riconoscimento. Mi sono dedicato soprattutto a questa seconda funzione dell'apparato visivo e tanto esporrò in questo libro. Tuttavia ho le mie idee sull'altra funzione di esso e dirò marginalmente. Sempre a margine accennerò anche alla mente e alla coscienza, mi chiederò se queste parole abbiano senso e quale sia il loro rapporto con il funzionamento del cervello. In questo quadro, usando un linguaggio che mi è estraneo, potrei dire che la visione è un'attività cosciente mentre il riconoscimento è un'attività inconscia.

Note.

L'immagine in copertina è la foto del busto di Democrito, creduto anche Eraclito. Essa è stata tratta dal sito di Wikipedia in lingua italiana.

Le figure di questo libro, a volte a colori, sono anche sul sito [www.beva.it](http://www.beva.it), che ospiterà anche le correzioni e le discussioni con i lettori, che invito a contattarmi all'indirizzo email: [info@beva.it](mailto:info@beva.it).

# Capitolo I - Mondo e cervello

## Premessa

In questo capitolo spiego la mia concezione dell'universo fisico e del cervello. E' un capitolo di filosofia, in esso espongo anche le scelte e le priorità nel mio lavoro. Sono mie opinioni, delle quali non è possibile verificare la verità, come per ogni teorizzazione filosofica, ma sono esse che mi hanno guidato e mi guidano nella progettazione e costruzione del cervello artificiale, il cui funzionamento, diversamente da esse, si può verificare.

## **1. Necessità di un modello meccanicistico del cervello in un universo che (forse) non è meccanicistico**

Il cervello è collegato al mondo attraverso i sensi; limitandomi a considerare il solo sistema visivo umano, devo chiedermi che cosa succede nel cervello quando guardo dalla finestra e vedo il monte, con le sue pietraie rosse, i suoi boschi verdi e il cielo azzurro sopra. Paradossalmente lo studio della neurofisiologia sembra generare altra confusione. Infatti ogni immagine risulta capovolta sulla retina, va sui recettori, coni e bastoncelli, che convergono in modo diverso sulle singole fibre del nervo ottico, ci sono poi cellule che li collegano orizzontalmente. Vorrei far notare che i recettori, che reagiscono alla luce, stanno sotto le cellule orizzontali, amacrine e gangliari: non sono esposti alla luce ma coperti! Questa sola osservazione basta a mostrarci come la complessità e la confusione regnino nell'apparato visivo e avverta del grande sforzo che sarà necessario a chiunque voglia chiarirne il suo funzionamento. Poi i nervi dei due occhi si incrociano nel chiasma, per interessare i due corpi genicolati opposti (ma una porzione rimane nello stesso emisfero cerebrale) e vanno alla corteccia visiva. Per tacere delle fibre che procedono dal nervo ottico al mesencefalo e poi da questo ne partono altre che vanno anch'esse alla corteccia visiva. Durante questo percorso dall'occhio al cervello l'informazione visiva viene elaborata (meno nell'uomo ma sempre più man mano si scende nella scala evolutiva).

Mi pare sensato accentuare della corteccia visiva: la visione avviene in quest'area. Gli uomini, ma anche gli animali superiori, che ne sono privati risultano ciechi. Gli animali inferiori no: già i topi senza la corteccia visiva si orientano grosso modo come prima nell'ambiente. Evidentemente per loro il ruolo della visione mesencefalica, quasi estinta nell'uomo, è ancora importante. Ho detto quasi estinta nell'uomo perché a mio avviso la visione cieca, scoperta nel 1973 da Poppel, Held e Frost, nei casi in cui la corteccia visiva umana sia del tutto distrutta è proprio questo. Ciò premesso, nella corteccia, l'immagine sulla retina genera eccitazioni sproporzionate e scisse in frammenti sparsi, con una forma che non assomiglia per nulla all'immagine che si proietta sulla retina e che noi vediamo.

Dov'è l'immagine del mio monte, con le sue pietraie, i suoi boschi e il cielo azzurro sopra? Non nella corteccia visiva e in nessuna parte del cervello. Dire che ciò noi vediamo è nella corteccia visiva non significa che l'eccitazione delle sue cellule riformi il disegno dell'immagine sulla retina. Chi è abituato alla matematica dirà poco male: i punti della retina sono in corrispondenza, che qualcuno chiama topografica, con i punti della corteccia visiva, dunque è facile risalire da questi alle eccitazioni retiniche cioè al disegno della forma che si proietta sulla retina. Il problema è che questa corrispondenza non è precisa; infatti non è che il nervo che parte dalla retina arrivi a una cellula della corteccia visiva. Della corrispondenza topografica occorre tenere conto ma da sola

porterebbe a ricostruzioni di figure sfocate e confuse. Piuttosto ritengo che quello che noi vediamo sia la rappresentazione dell'informazione che le portano i nervi dalla retina, che in parte è già elaborata e in gran parte elabora la corteccia stessa.

Chiunque sa che il cervello della mosca è diverso da quello dell'uomo. Entrambi uomo e mosca, hanno due occhi che ricevono informazioni dal mondo esterno ma è impossibile che i due esseri abbiano la stessa visione del mondo. Gli occhi della mosca, in se diversissimi da quelli dell'uomo, percepiscono più che altro variazioni della luce. Tuttavia sia per l'uomo che per la mosca ciò che vedono è mondo. Ci potrebbe essere chi dice: l'uomo è superiore alla mosca, il mondo è come lo vede l'uomo e non questi animali inferiori. In tal modo, secondo me, si cade in un errore, l'antropocentrismo, non diverso dal geocentrismo. Il mondo chissà com'è, quello che noi vediamo è un insieme di informazioni che permette di prevedere lo sviluppo di situazioni, relativo ai nostri bisogni elementari, che sono soddisfatti nell'ambiente in cui occhio e cervello si sono formati. Gli alberi e le case, li vediamo noi ma non la mosca, chissà come li vedrebbe un ipotetico essere diverso da noi, che arrivasse da un altro pianeta o anche solo la rana, che ha un sistema visivo diverso dall'uomo e dalla mosca. Gli alberi e le case sono rappresentazioni di cosa ci serve, chissà com'è la realtà. Già Democrito 2500 anni fa nel "Libro delle forme" scriveva che noi non sappiamo nulla conforme a verità intorno a nessuna cosa, in noi si forma una sorta di configurazione. Egli tuttavia credeva che sotto le illusioni percettive vi fosse una realtà fatta di atomi che si muovevano nel vuoto. David Hume, circa 2000 anni dopo, va oltre questa concezione meccanicistica, che confonde il mondo con il modello meccanicistico del mondo e afferma che la natura del mondo fuori del cervello è sconosciuta, che quello che noi chiamiamo realtà fisica è una rappresentazione mentale e che le leggi fisiche sono null'altro che comportamenti ricorrenti in questa rappresentazione.

Come si forma questa rappresentazione mentale o, in altre parole, questo modello? Se guardiamo all'evoluzione vediamo in essa enormi sofferenze e stragi volte ad eliminare i non adatti. Noi siamo i figli fortunati di quella lotta e il nostro corpo, cervello compreso, si è formato in un susseguirsi di eventi in cui non vedo alcun intento filosofico volto alla conoscenza dell'essere e della sua essenza. Nati non foste per vivere come bruti ma per seguir virtù e conoscenza? Per carità, no. Questa è un'incondivisibile opinione, senza riscontro, del Sommo Poeta. Da quanto osservo emerge piuttosto la necessità di avere un organo, il cervello, che possa prevedere lo sviluppo delle situazioni onde trarne benefici o evitare danni. Esso, con i sensi che lo collegano all'ambiente si è, anzi si sono formati, nell'ambiente in cui l'uomo vive e per soddisfare le esigenze del vivente. Spostato in un altro ambiente il cervello non darà previsioni giuste perché né esso né i sensi saranno atti a cogliere i segni premonitori. La fisica dell'estremamente piccolo è la prova di quanto dico: l'estensione delle leggi ricavate dal macrocosmo porta a teorie che sono sempre meno predittive quanto più si va nel piccolo. Incredibili sono invece i risultati che si osservano nell'estremamente veloce, dove distanze e tempi, base di ogni nostra esperienza nel mondo fisico, sono misurati come differenti fra due soggetti in moto veloce fra di loro. Personalmente dubito che la fisica possa ancora progredire in questi ambiti ed è dagli anni Venti del secolo scorso che ogni scoperta della fisica atomica e subatomica avviene unicamente grazie all'aumento della potenza dei macchinari con cui si osserva il mondo, senza che queste scoperte possano essere collegate in una teoria con potere predittivo. Anzi avviene il contrario: sono le scoperte che modificano le teorie e le estendono. Soltanto i modelli meccanicistici, sia quello atomistico di Leucippo e Democrito, sia quello pneumatico degli stoici, hanno portato seri risultati nella fisica, ovvero nella conoscenza della natura. Ecco perché dai miei diciannove anni, ormai lontani, mi ostino a chiamare questo mio studio "Meccanica cerebrale". Vorrei esplicitare che la mia ricerca si basa su un modello meccanicistico del cervello,

matematicizzabile e deterministico; infatti il modello meccanicistico è adatto alla comprensione e alla descrizione del cervello biologico perché non vi sono aspetti quantistici nel suo funzionamento: i neuroni sono costituiti da un gran numero di atomi e le correnti elettriche fra essi coinvolgono un gran numero di elettroni: siamo nel macrocosmo, nell'ambito della fisica classica, dunque il cervello si può o si potrà capire in futuro, mentre, a mio avviso e per le ragioni su cui mi diffonderò maggiormente in seguito, la fisica atomica e subatomica no, mai. Assunta questa posizione, sorge il problema: un cervello meccanicistico non può trarre previsioni da un mondo che, con ogni probabilità, visti gli insuccessi della fisica atomica e subatomica, non lo è? Consideriamo una persona, che chiamo Tizio, che osserva il mondo, i sensi di Tizio, a contatto con il mondo, provocano cambiamenti di stato nel suo cervello. In un cervello meccanicistico gli stati cerebrali, per i quali uso le prime lettere dell'alfabeto: A,B,C,D,... sono perfettamente quantificabili e definibili. In altre parole, se il cervello fosse fatto di ingranaggi e leve, essi avrebbero una precisa e specifica posizione, che ne definirebbe il suo stato; il cervello è di materiale organico ma nulla concettualmente cambia, siamo sempre nel macrocosmo. Uso le ultime lettere dell'alfabeto ...W,X,Y,Z, per annotare gli stati ambientali. Gli stati cerebrali sono provocati dagli stati ambientali e posso conoscere con precisione lo stato cerebrale A, perché per definizione il cervello è meccanicistico, ma non lo stato ambientale X, che provoca A: X lo devo definire attraverso lo stato cerebrale A, cosa in assoluto impossibile. Basta pensare che quando Tizio ode un suono il suo cervello assume un certo stato, ma lo stesso suono può essere prodotto da molte cose diverse, dove cose diverse stanno per stati ambientali diversi, che producono lo stesso suono. Così una mela vera e la sua copia finta appaiono uguali all'occhio e producono lo

.....  
.....

*Da pag. 28 a pag. 46*

## Capitolo III - I fondamenti della visione

### **Premessa**

Avevo 15 anni e mi chiedevo come potessi vedere le cose, come si formassero le immagini nel mio cervello. Andai alla biblioteca e presi dei libri che però non mi chiarirono le idee. Di quelle letture mi ricordo una bellissima immagine: secondo un sapiente indiano il mondo che appariva nella nostra mente era come il riflesso su una lastra di cristallo. Inutile dire che questo riflesso non è stato trovato nella nostra corteccia visiva né in altra parte del cervello. Tuttavia sulla corteccia visiva vi sono delle eccitazioni di cellule che possono essere messe in relazione con l'eccitazione della retina poiché derivano dalla elaborazione degli impulsi elettrici che provengono da essa. Il trattamento del segnale di provenienza retinica è l'informazione che il cervello ha del mondo, essa ci serve per orientarci nel mondo e riconoscere i suoi oggetti. Non ha senso la pretesa di "vedere" l'immagine del mondo dipinta nelle eccitazioni della corteccia visiva; mi devo destreggiare nel mondo, evitare buche, schivare ostacoli,... e nel cervello vi sono informazioni sul mondo che permettono questo mio agire. Esse mi appaiono come la sua immagine. Ritengo questa attività cosciente perché comporta un continuo adattarsi del vivente alle trasformazioni del mondo. Invece ritengo l'opera di riconoscimento inconscia perché l'oggetto è qual è e viene analizzato sempre con lo stesso processo automatico, come il lavoro di una ghiandola.

## 1. Luminanza e brillantezza

Il Sole a mezzogiorno e la Luna piena di notte, permettono entrambi di vedere, infatti si può camminare in montagna e per i prati anche nelle notti di Luna piena. Durante il giorno, l'illuminamento passa dai 50.000-80.000 lux del dì a 0,2 lux della notte, con una variazione di circa 300.000 volte. Ne consegue che la variazione della luminanza dei prati, delle strade, di ogni cosa alla luce naturale, che riflette la luce del Sole o della Luna è enorme. Quindi anche la variazione dell'illuminamento della retina, che coglie questa luce riflessa, è enorme e resta comunque considerevole nonostante la variazione dell'area della pupilla, che tende a normalizzarlo. Poiché la scarica dei recettori retinici ha una variazione di frequenza dell'ordine del migliaio di hertz, ritengo insensato pensare di porre questa frequenza proporzionale all'intensità dell'illuminamento retinico; non dimentichiamo che abbiamo a che fare con un sistema biologico, approssimativo, non con uno strumento da laboratorio. Infatti, sotto tale ipotesi, l'immagine di un oggetto che si proietta sulla retina, comporta una la variazione della frequenza dei recettori, notevole e rilevabilissima, nel passaggio fra luce diurna solare e luce notturna lunare. Tuttavia, nell'ipotesi che la scarica del recettore sia proporzionale al suo illuminamento, due aree di un foglio, una bianca e una nera, che si proiettano sulla retina, darebbero luogo, nei sottostanti recettori, a scariche di pressoché identica frequenza, sia essi siano sotto la zona bianca dell'immagine del foglio, sia che siano sotto quella nera, perché l'illuminamento retinico che produrrebbero non sarebbe poi così diverso, in relazione all'enorme variazione fra la luce del Sole e quella della Luna; la parte nera del foglio, pur riflettendo meno luce di quella bianca, ne riflette sempre moltissima. Questo perché la variazione della luminanza media del foglio al Sole o sotto la luce lunare è grande, mentre quando il foglio è al Sole la variazione della luminanza fra le sue parti, bianca e nera, è relativamente piccola. Se la frequenza degli impulsi dei recettori fosse proporzionale al loro illuminamento, e tanto determinasse la sensazione del chiaro e dello scuro, il foglio in questione, mezzo bianco e mezzo nero, apparirebbe come un insieme confuso di grigi chiari quando il foglio è al Sole e di grigi scuri quando esso è sotto la luce artificiale. La parte nera e quella bianca non apparirebbero ben delineate in nessuno dei due casi. A mio avviso il sistema visivo riesce a risolvere questo problema, oltre che con la variazione dell'area della pupilla, con un apparato, concettualmente costruibile, che regola la sensibilità dei recettori retinici. Nella mia ipotesi, esso dovrebbe agire in modo lievemente diverso nella visione monocromatica rispetto che nella visione cromatica. La visione periferica è sostanzialmente monocromatica, perché alla periferia della retina si trovano soprattutto i bastoncelli, insensibili alla frequenza luminosa. Invece la visione centrale è essenzialmente cromatica perché al centro della retina vi sono soprattutto coni, sensibili alle frequenze della luce. Nella visione periferica (o comunque in quella monocromatica) vi sono due regolazioni:

- 1) una che misura l'illuminamento della retina e agisce sulla pupilla al fine di normalizzarlo. In realtà la pupilla riesce soltanto a mitigare l'enorme variazione dell'illuminamento;
- 2) la seconda regolazione è volta allo scopo di permettere la rilevazione dei contorni delle figure, ovvero a generare una sensibile differenza di scarica dei recettori che si trovano sotto il bianco o sotto il nero dell'immagine che si proietta sulla retina.

Meccanizzare la prima regolazione è banale, l'unica avvertenza è che essa debba essere veloce onde i recettori non vengano rovinati per la troppa luce. Vi sono nel sistema visivo cellule che agiscono velocemente e penso abbiano questo scopo. La seconda regolazione si risolve ipotizzando un

apparato del sistema visivo, che modula la scarica dei recettori retinici in base all'illuminamento totale della retina. Il suo adattamento alla luce deve essere lento. Non so dove si collochi questo ipotetico apparato nell'uomo, come non so dove si trovi quello, sicuramente esistente, che agisce sulla pupilla. Ragionerò come se esso fosse collocato nell'occhio e che proceda in relazione alla misura dell'illuminamento della retina e agendo sulla sensibilità dei recettori in modo tale che sommando le loro scariche in tutta la retina in un'unità di tempo si ottenga un risultato costante, indipendentemente dall'illuminamento della retina. In altre parole, probabilmente a causa di un processo inibitorio, da tutta la retina partono sempre gli stessi impulsi ogni secondo, sia che entri nell'occhio tanta o poca luce. La grandezza in questione è conosciuta in elettrodinamica come intensità della corrente elettrica, definita come il numero di cariche che attraversano un conduttore nel tempo. In tal modo la scarica dei recettori perde la proporzionalità con l'illuminamento della retina ma variazioni locali dell'illuminamento della retina portano a variazioni della frequenza dei recettori sottostanti, che non risultano proporzionali all'illuminamento e quindi appiattiti, ma alla differenza fra il valor medio dell'illuminamento e il valore locale e quindi notevoli e rilevabilissime. Forse è opportuno un esempio aritmetico. In un certo mondo, sperso nell'universo, la luminanza varia fra le 100.000 unità della luminanza massima e 0 della minima; in quel mondo il sistema visivo delle persone genera scariche con variazione della frequenza 1000 hz e 0. Un osservatore guarda un foglio è per metà bianco e per metà nero. Il bianco ha luminanza 80.000 unità il nero ha luminanza 76.000 unità.

Nella prima ipotesi, di una frequenza di scarica proporzionale alla luminosità, la frequenza dei recettori sotto il bianco sarà 80 hz e quella sotto il nero sarà 76 hz. Una variazione di 4000 unità di luminanza produce la variazione di 4 hz.

Nella seconda ipotesi, tarando l'emissione sul valor medio, la luminanza massima di 80.000 stavolta produce la scarica di 1000 hz e quella di 76.000 unità produce la scarica di 0. In questo caso la differenza di scarica è rilevabile anche da un sistema poco sensibile come quello biologico.

Naturalmente questa è una semplificazione. La proporzione fra la frequenza della scarica e luminanza è completamente perduta ma le variazioni di illuminazione fra le varie zone della retina ora generano frequenze di scariche sensibilmente diverse. La citata proporzione era comunque già perduta a causa dell'operare della pupilla. Tutto questo è meccanizzabile e costruibile e mi pare ragionevole che ci sia un apparato in qualche parte del cervello o forse nell'occhio stesso. Forse sono le cellule orizzontali e amacrine che permettono la misura dell'illuminamento medio della retina attraverso un'integrazione spaziale, cioè la somma degli impulsi emessi da tutti i recettori e inibiscono più o meno la sensibilità dei bastoncelli. In effetti mi pare un funzionamento collegabile all'inibizione e in esso mi pare che abbiano un ruolo dei neuroni, scoperti nel sistema visivo, che cambiano con lentezza la risposta agli stimoli visivi. L'opera di questi neuroni si manifesta, a mio avviso, quando entriamo in una sala di proiezione cinematografica: solo dopo un po' riusciamo a vedere. La scarica, quando l'occhio funziona in visione periferica, è costante su tutta la retina ma ho buone ragioni di ritenere che un'analogia regolazione avvenga anche quando l'occhio funziona in regime di visione centrale, limitatamente alla parte della retina interessata. L'illuminamento sopra essa provoca un'ulteriore regolazione, partendo dalla regolazione avvenuta in visione periferica, ma più fine. Si vedrà in seguito che visione periferica e centrale sono alternative, non possono coesistere. Voglio infine far notare che nel modello che propongo, l'informazione della luminanza ambientale si ottiene dalla sensibilità dei recettori nella visione periferica, nella visione centrale e dall'apparato che regola la pupilla. Negli animali superiori l'informazione della luminosità non è poi così importante: il sistema visivo è volto soprattutto a individuare le immagini, definendole nei loro contorni. Pare che l'informazione della luminosità arrivi alla corteccia visiva

attraverso un altro canale e interessa un tipo di cellule cerebrali che non sono quelle che rispondono agli angoli, meno importanti delle prime nel riconoscimento delle forme. Secondo il modello proposto, al buio assoluto, anche se la sensibilità dei recettori è massima, non vi sarà scarica perché nessun fotone colpirà i recettori. Questa conclusione non è human like perché nell'uomo i recettori retinici generano sempre una scarica a bassa frequenza, detta scarica oscura. Sono consapevole di questa differenza. Tuttavia io tento una simulazione del funzionamento del sistema visivo nella quale devo sfrondare gli elementi che ritengo inessenziali, per non perdermi in un mucchio di rivoli.

Modulare la sensibilità dei recettori in modo da rendere costante l'intensità della scarica emessa da tutta la retina, spiega il paradosso, detto di Hering, del perché un mucchio di carbone, che di giorno emette più luce di quanta ne emetta un mucchio di neve di notte, continui ad apparire nero anche di giorno. Di giorno la somma degli impulsi che emette la retina è uguale a quella che essa emette di notte. Tuttavia il carbone di giorno forma una macchia sulla retina e i sensori sottostanti emettono impulsi con bassa frequenza. Di notte il mucchio di neve forma una macchia bianca sul nero della retina e i recettori sottostanti emettono scariche con alta frequenza. Anche causa della dilatazione della pupilla, la frequenza di scarica non è proporzionale alla luminanza del mucchio di carbone o di neve, perché la pupilla si dilata più o meno e la luminanza dell'immagine che si proietta sulla retina resta sconnessa dalla brillantezza del mucchio. Se rimane un minimo di informazione della luminanza assoluta nel cervello questo finisce di schiarire il carbone di giorno e scurire la neve di notte. Tanto dovrebbe rilevarsi come effetto secondario, minimo, rilevabile in alcune illusioni ottiche.

Mi si permetta un racconto personale: una volta avevo portato mia figlia piccola, di 8 o 10 anni, a visitare con un gruppo, l'osservatorio di Torino dove un astronomo, fra altre cose, in una conferenza ci disse che la Luna era nera, perché fatta di pietre di quel colore. Io non me ne accorsi ma mia figlia mi toccò il braccio e mi disse perplessa: "papà ma la Luna è bianca". Fui perfido e le dissi di chiederlo all'astronomo. Il pover'uomo rispose con un mucchio di parole insensate. Il cielo notturno ha una luminosità bassissima dell'ordine di  $10^{-4}$  nit, varia a seconda le ore notturne e a seconda l'inquinamento luminoso prodotto dalle città, ma resta sempre di molto inferiore ai 2500 nit della Luna. L'occhio si adatta alla bassa luminosità del cielo, la scarica neuronale si stabilizza per quella luminosità e la Luna è il particolare luminoso che interessa i recettori sottostanti che avranno una scarica ad alta frequenza.

L'importante è ottenere la rilevazione delle variazioni locali della luminosità attraverso una congrua variazione della scarica. Inoltre quando parlerò di visione centrale e periferica e del loro alternarsi, l'intensità della scarica che parte dall'occhio deve essere uguale in ambo i casi, quindi l'espressione che deve essere costante per unità di tempo da tutta la retina andrà rivista.

## **2. Inibizione e contorni**

I contorni della figura sono molto importanti, infatti la figura viene spesso riconosciuta attraverso la sua "silhouette" vedi fig. 6. Nel sistema visivo umano il contorno dell'oggetto è quello che viene spesso isolato dal movimento. All'interno della figura vi sono poi altri contorni, per esempio la bocca nel corpo umano, che servono a definire meglio il riconoscimento. I contorni della figura vengono anche rilevati attraverso l'inibizione laterale, che li marca e questo operare è visibile nell'illusione ottica nota come bande di Mach. La funzione spiegata sotto può essere associata all'inibizione laterale (non quella direzionale) genera le bande Mach, dunque non si allontana da

quello che dovrebbe avvenire a livello di retina e di corpo genicolato laterale. A mio avviso, il ruolo dell'inibizione laterale, non direzionale e direzionale, è collegato al riconoscimento delle forme attraverso gli angoli, oltre che alla marcatura dei contorni, come normalmente si dice.



Fig. 6

Comincio a trattare il secondo aspetto. Poiché ho dovuto provare questa teoria sul computer ho dovuto scriverle sotto forma matematica e siccome questo libro si rivolge al lettore colto ma non specialista non darò i passaggi scontati e mi diffonderò in spiegazioni che chi conosce la matematica giudicherà banali. Si Consideri un piano  $(x,y)$  su cui è disegnata una striscia bianca a sinistra, nera a destra, come quella in fig. 7 b), che sfuma fra i due colori nel centro. Lungo la retta  $u$ , parallela all'asse  $x$ , la luminanza di ogni suo punto è quella del diagramma  $(P,u)$  in fig. 7 c) . Considero adesso un cerchio fig. 7 a) e calcolo la luminanza media  $M$  in esso. Come prima caso considero un cerchio che abbia diametro maggiore dell'ampiezza della sfumatura. Immagino di far correre il suo centro sulla retta  $u$  di fig. 7 b) e ottengo il diagramma  $(M,u)$  in fig. 7 d) in cui è tracciata la luminanza media  $M$  del cerchio nei punti di  $u$ . Lontano dalla sfumatura  $(M,u)$  coinciderà con  $(P,u)$ , invece la sua parte inclinata di  $M$  avrà pendenza minore di quella di  $P$ . Infatti, pensando di far correre il cerchio da sinistra a destra, la luminosità media del cerchio comincia a diminuire appena la sua circonferenza entra nella sfumatura, mentre il centro è ancora nel bianco. La differenza fra i due diagrammi  $(M,u)$  e  $(P,u)$  forma il grafico  $(Q,u)$  in fig. 7 e). Se pensiamo il cerchio uniformemente illuminato, l'eccitazione del recettore al centro, è uguale all'eccitazione media dei recettori intorno ad esso e la funzione  $P-M$  vale zero. Se  $M < P$  come capita quando  $P$  è vicino alla sfumatura e alla sinistra di  $R$ ,  $P-M$  risulta positiva. Inversamente, quando tutto il cerchio è nel nero,  $P-M$  vale zero o ma quando il centro del cerchio è appena a destra di  $S$  è nel nero ma il cerchio è quasi metà nel nero e il resto nel grigio: mediamente la sua luminosità interna è maggiore di quella nel suo centro. Finora ho fatto muovere il centro  $P$  del cerchio su un retta  $u$  parallela all'asse  $x$  quindi sarebbe meglio scrivere  $P(x,y)$ ,  $M(x,y)$ ,  $Q(x,y)$ , si sarebbe ottenuta una più corretta rappresentazione tridimensionale che non cambia però il discorso che ho fatto. Non indico l'argomento della funzione per non appesantire la trattazione. Se sommo le funzioni  $M$  e  $P-M$ , aggiungendo un moltiplicatore reale  $k$ , con la ragionevole ipotesi che sia  $k > 1$ , ottengo la funzione:

$$Q = M + k(P - M) \quad (2)$$

il cui diagramma è quello in fig. 7 f), che richiama l'andamento della brillantezza con un punto chiarissimo di ascissa  $R$  e uno nerissimo di ascissa  $S$ , che sono le bande Mach. La funzione  $Q$  è quanto noi vediamo? Non del tutto direi ma è un gran passo avanti per la comprensione del processo visivo. E' vero che le bande di Mach non appaiono sempre alla vista, ma solo nel caso di

sfumature piuttosto ampie, più precisamente potremmo dire se il diametro del cerchio di convergenza è minore dell'ampiezza della sfumatura. In questo caso la funzione Q spiega bene il fenomeno, ha lo stesso comportamento della brillantezza.

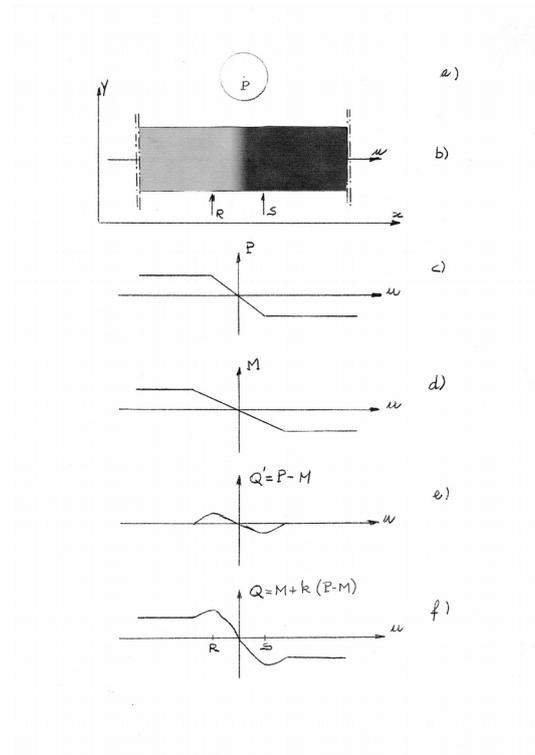


Fig. 7

Si osservi  $Q'$ , fig. 8 e) che presenta due estremi distinti collegati da un segmento coincidente con l'asse  $u$ . In tale zona infatti la pendenza di  $P$  e quella di  $M$  sono uguali, esse differiscono solo alla fine e all'inizio della sfumatura. Se invece la sfumatura è stretta, ovvero minore del cerchio di convergenza, l'andamento di  $Q'$  è quello in fig. 7 e). Di conseguenza si hanno gli andamenti di  $Q$  rispettivamente nelle figg. 7 f) e 8 f). Non mi pare di rilevare un andamento della brillantezza descritto da  $Q$  nella fig. 7 f). Per essere più sicuro, in fig. 9 studio l'andamento della funzione  $Q$  quando il disegno non ha sfumature ma la luminanza passa, con uno scalino, da un valore alto a uno basso, dal bianco al nero. Anche in questo caso la  $Q$  presenta due variazioni  $AB$  e  $A'B'$  che non sono percepite. Per ora la funzione  $Q$  può considerarsi aderente alla percezione visiva solo nel caso della sfumatura ampia.

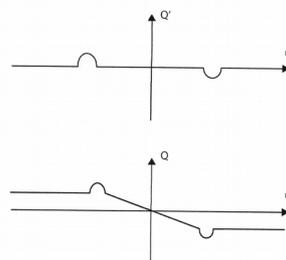


Fig. 8

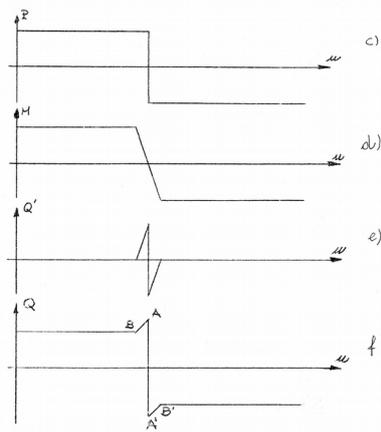


Fig. 9

Nei casi delle Figg. 7 f) e 9 f) Q non la si può considerare come la brillantezza perché non c'è aderenza con i fatti sperimentali. Volevo far presente questo problema, che si risolverà in seguito. In ultimo vorrei dire che ho considerato le sfumature con andamento lineare e monotono. Altri andamenti forse producono altri effetti, che potranno essere argomento di esperimenti di psicofisica per ulteriori verifiche di questa teoria.

La funzione Q marca i contorni? Ho già detto che i punti non stanno tutti sulla retta  $u$  ma sul piano  $(x,y)$ , quindi la funzione P è in realtà  $P(x,y)$  il cui valore dipende dal punto del piano. Essa è analoga alla (1) e vale il parallelo con la carta a rilievo che ho usato per spiegarla. Chi ha un po' di pratica nel trattamento delle immagini computerizzate sa che la figura si presenta come una tabella con tanti numeri, ognuno dei quali rappresenta la posizione  $(x,y)$  e la luminosità  $z=P(x,y)$  di un'areola. Insieme, queste areole variamente illuminate formano l'immagine. Più tecnicamente si parla di matrice di pixels. Con questi dati il computer deve riuscire a distinguere un oggetto dallo sfondo o che è lo stesso, trovare i contorni dell'oggetto così da stabilire la distinzione fra esso e l'ambiente in cui è immerso. Inizialmente si era provato con la sogliatura, ovvero si provò a prendere solo i punti sotto una certa luminosità, che sono i numeri piccoli della tabella, pensando che l'oggetto fosse meno luminoso dell'ambiente. Per questo basta ordinare al computer di eliminare i numeri superiori ad un numero dato, detto soglia e il computer lo fa. Tuttavia il risultato fu penoso, infatti non è detto che l'oggetto sia scuro e lo sfondo sia chiaro. Inoltre, anche se così fosse, il computer considererà l'ombra dell'oggetto, che è scura, come parte dell'oggetto. Invertendo i ruoli di chiaro e scuro, ponendo delle soglie mobili, i risultati non miglioravano. Questa tecnica è stata esplorata agli albori degli studi sulle immagini computerizzate, ora è solo più usata per rozze applicazioni industriali. Ho scritto le righe precedenti per introdurre la materia e far comprendere le difficoltà che si incontrano a realizzare atti apparentemente semplici, come distinguere un oggetto dallo sfondo. Una persona colta ma non del ramo che legge queste pagine deve esserne edotta. Chi poi vorrà saperne di più può trovare tutto sulla edge detection (estrazione dei contorni) e sulla segmentation (isolamento dell'oggetto dallo sfondo) nei libri di image processing. Per trovare i contorni, che è poi isolare la figura dallo sfondo, non c'è solo la sogliatura vi sono tanti altri metodi. Nella letteratura il problema è affrontato usando soprattutto gradienti e a volte laplaciani io tenderei ad essere aderente al funzionamento cerebrale, notando innanzi tutto che il movimento isola l'oggetto dallo sfondo e che attiva le cellule fasiche Y sul suo contorno. Ritengo il gradiente così ottenuto grossolano, una traccia da seguire da essere migliorato coltivando l'idea di inibizione laterale. In effetti i giocattoli dei bambini sono fortemente colorati e attirano l'attenzione muovendosi. Detto questo, ritengo che il contorno della figura si formi pian piano nel cervello attraverso una progressiva memorizzazione

ed affinamento. Quindi ben venga il movimento, ben vengano i contrasti forti, sono utilissimi a facilitare la costruzione progressiva del contorno entro il cervello.

Ciò premesso, propongo che un contorno si debba avere dove la funzione  $Q=P-M$  sia diversa da zero. Chi prova con il computer vedrà che in questo modo si estrae un contorno molto “spesso”, intendo dire che esso si presenta come una striscia e non come una linea (vedi fig. 12 a). In altre zone dell’immagine, compare anche un disturbo, detto sale e pepe, ovvero dei punti dove  $Q'$  ha valore diverso dallo zero e macchie dove non c’è nessun contorno. Questi problemi non si risolvono filtrando  $Q'$  con una soglia perché in tal modo si rischia di eliminare anche tratti di contorni validi: il rimedio è tentare di simulare l’inibizione direzionale, che richiede, come primo passo, di osservare la presenza di un gradiente di  $Q$  fra  $R$  e  $S$  (rif. fig. 7 f), Siccome ho testato sul computer la teoria che segue, ho preferito non applicare la definizione di gradiente, basata sulle derivate parziali, che deriva dalle reminiscenze universitarie, perché inadatta a una superficie reale. I gradienti, se si trattasse di piani inclinati geometrici, perfetti, sarebbero paralleli, come in fig. 4 b. Nel nostro caso non è così, come non è così in una costa montana, con buche e sassi, tuttavia come su una costa montana anche in questo caso, i gradienti sono in generale orientati allo stesso modo, in direzione dall’alto in basso. Questo sui contorni della figura, invece nelle macchie, zone disturbate, che non sono contorni, la funzione  $Q'$  è diversa da zero ma i suoi gradienti non hanno una precisa orientazione. Per cogliere il gradiente, ho considerato un cerchio fig. 10, molto più piccolo della matrice di pixel che contiene l’intera immagine, e ho calcolato la somma dei valori di  $P$  rispettivamente nel semicerchio tratteggiato e in quello bianco. Quindi ho fatto la differenza e lo annotata nella prima colonna di una matrice a due colonne, nella seconda delle quali ho scritto l’angolazione di  $AB$ . Poi ho ruotato  $AB$  di alcuni gradi e ho rifatto l’operazione fino a formare un angolo piatto. Il massimo, in valore assoluto, perché non importa il verso, della differenza permette di capire la direzione della pendenza massima del piano inclinato e d’ora in poi chiamerò questa gradiente. In tal modo si mediano le irregolarità della superficie  $Q$  e se ne coglie l’inclinazione massima. Ipotizzo che intorno a questo rilevatore, quando segnala un gradiente, si diffonda un vasto campo di direzioni che influenza gli altri rilevatori a cogliere i gradienti paralleli al suo. Pensiamo, per esempio, che un rilevatore abbia colto un gradiente verticale (rif. fig. 11), il campo che genera fa sì che gli altri rilevatori che si trovano lungo la direzione  $AB$ , che è orizzontale o nelle sue immediate vicinanze, siano sensibilizzati a cogliere le direzioni verticali di eventuali rilevatori eccitati. Al contrario, fuori di questa zona lo stesso campo fa sì che i rilevatori abbiano inibita la capacità di cogliere i gradienti verticali. Considerando varie illusioni ottiche posso dire che il campo è vasto e decresce poco allontanandosi dal rilevatore che lo genera. Inoltre penso che l’effetto di sensibilizzare la rilevazione del gradiente verticale interessi una stretta striscia a cavallo di  $AB$  e per il resto la direzione verticale sia inibita. Penso che con esperimenti di psicofisica si possa definire quantitativamente una funzione  $f(\rho, \theta)$ . Ovviamente il discorso non cambia se il gradiente del rilevatore non sia verticale ma comunque ruotato.

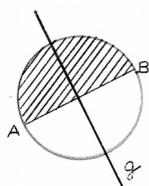


Fig. 10

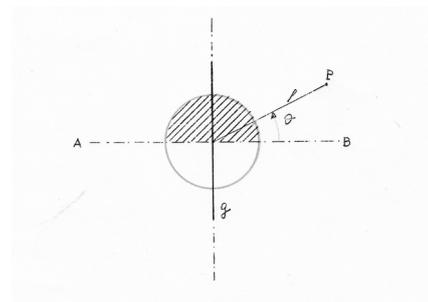


Fig. 11

Per inciso quest'ultima osservazione non è perfettamente human like perché esperimenti neurofisiologici mostrano che la velocità dello spandersi dell'inibizione laterale dipende dalla direzione considerata. Conscio di questo, ritengo impossibile simulare esattamente, almeno con le conoscenze attuali, un apparato così complesso e poco noto come il sistema visivo e preferisco restare sulle linee essenziali. I campi direzionali si sommano, anche se bisogna ricordare che non sono dei campi vettoriali e che mentre per due vettori l'essere opposti significa avere versi contrari, per due direzioni essere opposte significa essere perpendicolari. Tuttavia anche con larghissime ipotesi sulla somma delle direzioni possiamo affermare che alcuni rilevatori del gradiente, per esempio verticale, allineati, ovvero con i diametri AB (fig. 8) su una stesa retta, generino dei campi che si sommano, producendo una linea (o stretta striscia), da definirsi quantitativamente, di campo orizzontale intensa che magnifica la sensibilità dei rilevatori sottostanti a cogliere i gradienti verticali. Tale linea, che chiamerò linea privilegiata o striscia privilegiata (lp) si estende anche dove i gradienti non ci sono. Invece fuori di questa striscia e quindi intorno a essa il campo è tale da inibire la rilevazione dei gradienti verticali. L'inibizione direzionale si accorda e perfeziona l'inibizione non direzionale. Le ho mantenute separate perché mi sembra che questo sia lo schema del sistema visivo e inoltre simulando la prima si alleggeriscono i calcoli del computer. Il trasposto delle evidenze neurofisiologiche sull'inibizione direzionale trova anche in questo caso conferma sui test eseguiti sul computer, produce l'assottigliamento del contorno (rif. fig. 12 b) e spiega molte illusioni ottiche. La prima evidenza psicofisica deriva dalle linee parallele vicine che perturbano la visione e producono strani effetti ottici perché i loro gradienti, allineati uno di fronte all'altro si inibiscono. C'è chi dice che il mantello delle zebre abbia quel disegno perché confonde la vista dei predatori. Permette anche di avvicinarci a perché le bande di Mach non si vedano quando la funzione Q deriva da una sfumatura stretta o nulla, come in fig. 9. In fig. 9 f) si nota un fortissimo gradiente AA' con conseguente formazione di direzione privilegiata che elimina la possibilità di rilevare gradienti nel suo intorno e quindi impedendo la rilevazione dei gradienti sulle superfici AB e A'B'. Questi gradienti sono rilevabili su Q in fig. 8 f, dalle due parti dei massimi che derivano dalla fig. 8 e) perché trattasi di due linee di massimo poco intense che non riescono a sopraffarsi. Q sembra un buon candidato per descrivere "quanto di vede", tuttavia non è rigorosamente vero, occorrono ulteriori precisazioni. Per la funzione Q, legata all'inibizione non direzionale, si fa sempre più stringente il parallelo con bande di Mach visibili dalle persone, analogamente devo trovare nella visione umana il riscontro per l'ipotesi della direzione privilegiata, legata all'inibizione direzionale, che pur ha evidenze neurofisiologiche. A tal fine si consideri il rilevatore di gradiente in fig. 13 a), posto in un luogo dell'immagine dove vi sia un gradiente di luminosità ma non vi sia un campo direzionale, in tali condizione di isotropia si ricava la direzione e l'intensità del gradiente. Si generi poi sopra esso un campo nella direzione AB in fig. 13 b). Tale campo potrebbe essere prodotto da una linea retta disegnata vicino al rilevatore.



Fig. 12 a)



Fig. 12 b)

Il campo direzionale inibisce sensibilità alla rilevazione del gradiente lungo normale ad esso, mentre lascia inalterata la sensibilità lungo la sua parallela. In altre parole, la componente direzionale lungo  $n$  risulta diminuita dalla presenza del campo mentre quella lungo  $p$  risulta invariata. Di conseguenza il gradiente ruota in senso antiorario, oltre che essere diminuito in modulo. Consideriamo ora l'angolo ABC, in fig. 13 c). Il lato BC è soggetto al campo che genera il lato AB e viceversa ma per fissare le idee restiamo al primo caso. Ogni rilevatore sul lato CB ha la componente del gradiente normale ad AB diminuita, quindi il rilevatore ruoterà in senso antiorario come quello in fig. 13 a). Ogni rilevatore sul lato BC lo farà e si avranno tanti piccoli segmenti  $M'N'$ , formanti una seghettatura sul lato. Questo non si vede ma non è per un errore, la spiegazione sarà nel paragrafo seguente. Consideriamo adesso un angolo ottuso come in fig. 13 e). Il campo della  $dp$ , prodotta dal lato AB si estende intorno ad esso e influisce sul lato BC. Anche in questo caso la perdita di sensibilità avviene sulla normale ad AB e ogni rilevatore di gradiente ruota in senso orario. Anche qui c'è il discorso della seghettatura. Comunque fin d'ora è difficile non intuire un legame fra questi risultati e gli esperimenti di Carpenter e Blakemore secondo cui l'angolo acuto viene percepito ampliato e quello ottuso diminuito. Il lettore provi a ripetere il ragionamento invertendo i contrasti, considerando che sia il lato BC a generare il campo e quello AB a subirlo.

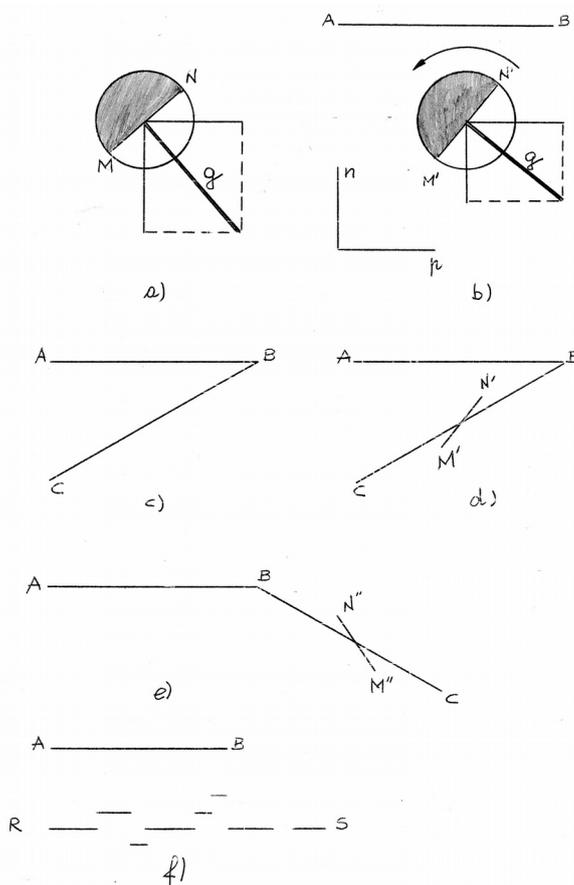


Fig. 13

Sempre in merito alla seghettatura un debole contrasto potrebbe formare una “scaletta” come in fig. 13 f), in cui un rilevatore di gradiente elimina quelli vicini paralleli. Anche questa non è percepita e anche di questa si parlerà nel prossimo paragrafo. L'ipotesi della  $dp$  permette di iniziare la spiegazione dell'illusione l'illusione di Kanizsa in fig. 14.

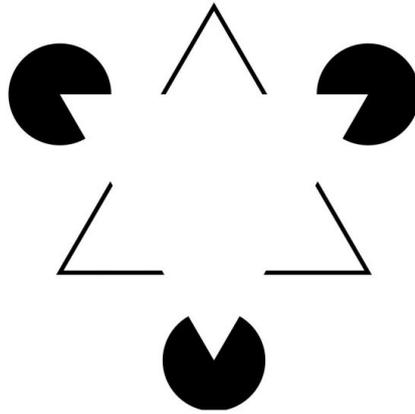


Fig. 14

I lati del triangolo sono infatti il prolungamento del campo direzionale, in particolare della linea privilegiata, che procede dai lati dei settori circolari bianchi intagliati nel cerchio nero. Sotto la  $lp$  i rilevatori di gradiente sono sensibilizzati a rilevare i gradienti normali ad essa. In tal modo essi tendono a cogliere e a magnificare i disturbi, tecnicamente parlando il rumore, lungo questa direzione mostrando un debole e malsicuro contrasto che in realtà non c'è. Rimane da spiegare l'effetto di profondità: perché il triangolo di Kanizsa appare in rilievo? Tenterò di rispondere nel paragrafo seguente. Perché tutto questo? A mio avviso queste distorsioni delle immagini sono il risultato dell'elaborazione volta a cogliere gli angoli sul contorno della figura.

.....  
.....

*Da pag. 94 a pag. 101.*

## Capitolo V – Il riconoscimento topologico delle forme.

### **Premessa.**

Un metodo classico per riconoscere le forme è avvalersi di certe loro particolarità come l'aver i punti in certe posizioni, avere dei contorni retti in certe posizioni del perimetro, presentare dei fori in certe zone, avere un certo rapporto area perimetro,... ognuna di queste caratteristiche viene vista come una dimensione di uno spazio e una specifica forma, definita dal valore delle caratteristiche, viene vista come un vettore in questo spazio. Poi si può dire che due forme appartengono alla stessa classe se i vettori che formano non differiscono oltre una certa misura. Avevo diciannove anni e ritenevo questo approccio debole perché e sfociava in un ciarpame di complesse formulazioni matematiche invece di porre attenzione su quali fossero le caratteristiche che potessero descrivere le forme. Quelle che vedevo usare erano "ad hoc", funzionavano per una classe di oggetti ma non in generale. Ne parlai con dei professori ma mi dissero che mi ponevo un problema inessenziale. Erano innamorati della matematica, non vedevano il vuoto che c'era sotto. Secondo me, invece, volendo riconoscere tutte le forme occorreva capire quali fossero le caratteristiche che avrebbero permesso di raggiungere lo scopo.

Non amo ragionare sul particolare e pur non essendo ricco, non ero né sono pressato da motivi economici a dover costruire e vendere macchinari utili per specifiche applicazioni industriali; partii alla lontana, potevo farlo, allora avevo molto, molto tempo davanti. Anche tempo per discutere di politica e di religione e tempo per passeggiare lungo il Po, nelle Langhe, in pomeriggi e sere che

sembravano non finire. Tempo per gli amori. Tempo per guardare il cielo e le stelle, coperti in parte dalla figura della cappella di Santa Anastasia, sentire il profumo del prato e il cane che abbaia lontano. Nudi, bella nella tua gioventù, contenti di quello che potevamo darci. Le stesse sensazioni, nello stesso posto, non le abbiamo più avute quindici anni dopo. Soli e infelici, sciocamente ci avevamo riprovato. Io sorrisi nel constatare quanto meno fossi inibita. I confronti li avrai fatti anche tu.

Non funzionò.

Fu l'ultima volta.

Tuttavia tutto ciò non mi distrasse mai dai miei studi sul cervello, tanto meno lo fecero i miei studi ufficiali di fisica, a cui dedicai sforzi marginali. Filosofai tanto, per avere un quadro di riferimento che mi guidasse e non mi lasciasse precipitare nella miserabile ricerca di un risultato immediato. Conclusi, come ho scritto, che non possiamo conoscere il mondo esterno al cervello ma il cervello deve poter realizzare la previsione. Com'è possibile progettare dei sensi che colleghino mondo e cervello se non si sa nulla sul mondo che i sensi vorrebbero esplorare? Non c'è possibilità di un ragionamento, infatti la natura ha provveduto con la selezione naturale a formare i sensi (e il cervello) adatti allo scopo ed essi riescono a realizzare questa previsione (con buona probabilità). Nell'uomo il senso principale è quello della vista e la previsione parte dal riconoscimento delle forme, che, a mio avviso, conformemente al Piaget, avviene dapprima in modo topologico e poi è affinato in modo sintattico. Sempre a mio avviso, il primo modo è anche proprio degli animali superiori. Il termine topologia, che uso perché lo ha usato il Piaget, non va inteso nel senso esteso che oggi esso ha assunto nella matematica ma piuttosto nel suo significato intuitivo e primigenio di "geometria del foglio di gomma" o geometria del continuo. Anzi, anche questa accezione va limitata: il cervello deve riconoscere appartenenti alla stessa classe quelle figure che un bambino con meno di tre anni dice che si assomigliano. Nei paragrafi seguenti tenterò di meccanizzare quest'idea della somiglianza. Per chi non sia esperto del trattamento di immagini sul computer dirò che i dispositivi per studiare le forme si realizzano collegando una telecamera a un computer che, limitatamente alla visione in bianco e nero, trasforma l'immagine in una schermata di tanti quadratini adiacenti e ordinati, ognuno dei quali ha una tonalità di grigio. Parallelamente si parla di una matrice (di una tavola) di pixels (quadratini) ognuno dei quali ha una posizione, definita dalle sue coordinate e un valore, livello di grigio. Lo stesso oggetto ruotato, traslato o allontanato dalla telecamera, produce immagini differenti e parallelamente matrici di pixels differenti. Come fa il computer riconoscere che l'oggetto è lo stesso se le matrici di pixels sono diverse? Finché si tratta di rotazioni, traslazioni o rimpicciolimenti (purché in scala) non è difficile far capire al computer che si tratta dello stesso oggetto, queste trasformazioni sono dette lineari e sono note in matematica, basta applicarle nei programmi ma se due oggetti sono lievemente differenti, come due lettere alfabetiche di foggia tipografica diversa, non c'è un modo generale ma una serie di artifici ad hoc che funzionano per una modesta classe di forme, come potrebbe essere quella delle lettere dell'alfabeto latino, ma gli stessi artifici non funzioneranno più per l'alfabeto arabo. Questo è problema che perseguita la visione artificiale dagli ultimi anni Quaranta. Riflettendo su quest'argomento, verso i miei ventotto anni, mi venne in mente un'idea, che tuttora pongo alla base del mio sistema di riconoscimento delle forme. Ragionai su una freccia come in fig. 51 una sua rotazione, una sua traslazione o rimpicciolimento in scala non avrebbe influito sui suoi angoli, quindi se avessi usato questi per descrivere la figura, avrei risparmiato i pesanti calcoli necessari per seguirla nelle trasformazioni lineari. Già non era poco, inoltre poiché l'idea era valida per le trasformazioni lineari, perché non tentare di porla, con opportuni perfezionamenti, alla base di un riconoscimento generale delle forme? Cercai conforto a queste mie intuizioni nella letteratura e

trovai che anche Attneave riteneva gli angoli essenziali per il riconoscimento delle forme, celebre è il “gatto di Attneave” in fig. 52, che è inequivocabilmente un gatto e tutta l’informazione su esso deriva dagli angoli. Poi trovai i lavori dei neurofisiologi Hubel e Wiesel e capii di essere sulla buona strada.

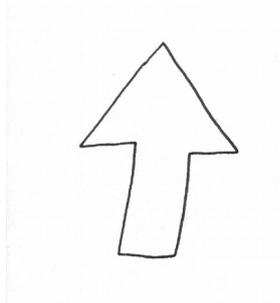


Fig. 51

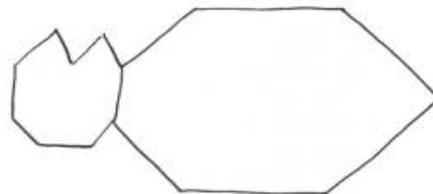


Fig. 52

Notai che gli angoli di una freccia disegnata su un foglio di gomma tirato inopinatamente cambiano il loro valore e se si eccede insieme al cambio del valore degli angoli, la figura disegnata perde la forma di freccia, nel senso che un bambino non la riconoscerebbe più come tale. I limiti alle deformazioni della figura, affinché ne generi un’altra somigliante, sono limiti alla variazione dei suoi angoli. Ciò non contrasta con il funzionamento cerebrale perché Hubel e Wiesel scoprirono che le cellule che rispondevano a barre luminose di determinata inclinazione, continuavano a farlo fino a che l’inclinazione della barra variava entro i 10 – 15 gradi, oltre questa approssimazione erano altre cellule a rispondere. Inoltre le cellule che rispondevano ad una barra continuavano a rispondere se la barra veniva spostata entro una certa limitata area. Applicai queste idee sul computer, grosso modo posso dire che dopo aver estratto il contorno (il perimetro) della figura, misuravo i suoi angoli nella successione in cui si trovavano sul perimetro e quindi li confrontavo con altre analoghe successioni, ricavate da figure precedenti, memorizzate entro tabelle, fino a trovare, se esisteva, quella corrispondente, ovvero quella che aveva gli angoli entro le dette approssimazioni, uguali alla presente. Immediatamente compresi che in due figure, che il bambino giudicava somiglianti, vi erano dei particolari diversi e che a causa di questo, le loro successioni di angoli erano diverse e che il computer non sarebbe riuscito a riconoscere le parti uguali e a stabilire che le due forme appartenevano alla stessa classe. Si trattava di eliminare questi particolari poco importanti ed arrivare alla “forma essenziale” cioè una successione di angoli e posizioni identica per tutte le figure somiglianti. Diversamente da quanto può apparire l’espressione “forma essenziale” non appartiene alla vuota retorica, sarà definita operativamente. Per questo costruii un “modello a strati”, strato dopo strato la figura perdeva i particolari di poco conto e si avvicinava alla forma essenziale. Nei primi anni Ottanta utilizzai e mi si permetta, inventai, un metodo di rappresentazione di tipo gerarchico dell’informazione, ora (anno 2019) molto di moda, che va sotto il nome di “deep learning”. Sorsero due problemi: 1) come far sì che il computer discernesse i particolari poco importanti della forma ed 2) entro la rappresentazione gerarchica dell’informazione, sempre più astratta strato dopo strato, come poteva il computer scegliere la “forma essenziale”. Per il primo problema fu naturale ricorrere agli angoli. Mi accorsi che si poteva definire la potenza di un angolo e che questa era anche la misura dell’importanza del particolare della figura. Nel modello a strati venivano via via eliminati gli angoli meno potenti della figura, ovvero particolari poco importanti. La figura si schematizzava fino a raggiungere la sua “forma essenziale” e oltre, perché poi il processo continuava ed essa raggiungeva, se la figura di partenza

era chiusa, qualunque forma iniziale essa avesse, la forma di un triangolo, la più generale delle figure chiuse. Circa il secondo problema la scelta dello strato da considerare come contenete la forma essenziale poteva avvenire solo attraverso l'insegnamento o l'esperienza della macchina e come si vedrà in seguito, si può meccanizzare.

Dagli anni Quaranta del secolo scorso si discute molto di reti neuronali, di perceptron, che non erano molto diversi dalle prime ma più volti al riconoscimento delle forme. In tutti questi dispositivi erano previsti dei collegamenti fra "neuroni" che venivano premiati o depressi in base all'insegnamento. L'approccio diede risultati insoddisfacenti e per decenni l'argomento fu accantonato, per essere ripreso da una ventina di anni a questa parte, pressoché negli stessi termini ma avvalendosi di calcolatori molto più potenti. Io penso che l'idea alla base del perceptron sia giusta ma incompleta: il problema è il solito, la mancata definizione delle caratteristiche. Per il riconoscimento delle forme, le caratteristiche, almeno le principali, a mio avviso, sono gli angoli e per definire la forma essenziale ho applicato le idee della rete neuronale premiando le caratteristiche uguali in ogni classe di forme. Le reti neuronali (o neurali o neuroniche) funzionano bene con le caratteristiche proprie di una la classe di immagini, con gli angoli dovrebbero funzionare per ogni immagine. Lo scopo, la speranza è di realizzare un sistema di riconoscimento "general purpose", come si diceva un tempo e "human like". Non dico che gli angoli siano l'unica caratteristica che permetta di realizzare il riconoscimento delle forme ma a mio avviso è quella basilare. Altre caratteristiche come i colori, le dimensioni,... possono essere utili al riconoscimento ma in subordine agli angoli e questo limitatamente al senso della vista perché nell'uomo sono in subordine anche gli odori, i sapori,... che vengono da altri sensi.

## 1. La potenza degli angoli.

Nel gatto vi sono delle cellule nella corteccia visiva che rispondono a delle barre variamente inclinate poste nella visuale del gatto. Variando di una decina di gradi l'inclinazione della barra varia la cellula che risponde. Si può certo dire che tali cellule sono sensibili agli angoli ma non agli angoli a cui siamo abituati, nel loro significato geometrico, che hanno due lati e un vertice. Comunque fra le barre angolate e gli angoli esiste un legame; infatti se si considera la fig. 53 si conviene che intorno al suo perimetro vi è una striscia fortemente eccitata all'esterno e sempre adiacente al perimetro, ma all'interno, vi è una striscia fortemente inibita. Questo per il fenomeno dell'inibizione laterale.

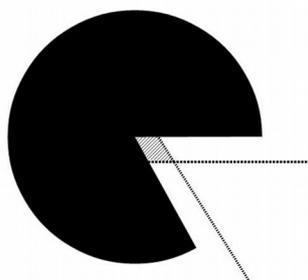


Fig. 53

Intorno al vertice della rientranza, all'esterno della figura le due strisce eccitate si sommano dando luogo ad un massimo di eccitazione, il poligono che in figura è tratteggiato. Anche senza entrare nel merito della funzione somma delle eccitazioni si può dire che 1) essa è tanto maggiore quanto più l'angolo è acuto e 2) che essa sussiste solo se entrambi i lati sono sufficientemente lunghi. Se si

pensa a un angolo acuto con un lato lungo e l'altro lato molto corto, la striscia eccitata sul lato lungo è anch'essa lunga ma, quella sul lato corto è corta e la somma delle due strisce eccitate che avviene vicino al vertice dell'angolo, è lunga solo quanto il lato più corto. Dunque l'eccitazione sul vertice di un angolo con (almeno) un lato corto è modesta. Modesta è anche la somma delle eccitazioni delle due strisce sui lati di un angolo ottuso. Esse si divaricano e si sommano

.....  
 .....

*Pagg. 124 e 125*

caratteristica del sistema visivo. Si voglia, per esempio, cercare una casa in un paesaggio di auto, alberi, animali. Si può eccitare la configurazione residua della casa e guardare il paesaggio in modalità visione periferica. La casa occupa un'area minima nel del cerchio visivo che è un cerchio grande, atto alla visione periferica. Data l'alta convergenza delle fibre ottiche sullo stesso nervo visivo la casa non può contenere dettagli. Essa sarà elaborata (come il resto dell'immagine) nel modello a strati e le sue contratte alte troveranno corrispondenza in quelle basse, memorizzate, della casa. Questo perché la forma residua deriva dall'osservazione della casa in visione centrale, le contratte alte che procedono dalla visione centrale non possono trovare riscontro con quelle alte che derivano dalla visione periferica, che deriva da immagini poco dettagliate. Mentre le contratte alte della visione periferica trovano riscontro nelle contratte più basse della forma residua, nella quale i dettagli della casa sono stati eliminati con altro metodo ma con risultati affini. A causa di questa corrispondenza la casa potrà venire isolata in visione centrale, per essere riconosciuta con certezza.

## 6. La struttura della cella visiva.

La cella di memoria visiva che ho realizzato sul computer è assai semplice, consta di una configurazione, ovvero di un'insieme di contratte, di un nome e di eventuali sinonimi. Nel modello cerebrale che propongo le celle di memoria in genere, non solo quelle visive, sono più complesse, schematizzate in fig. 68. Nell'ultima riga di esse stanno le caratteristiche, che per il sistema visivo sono nella configurazione. Nella prima riga esse hanno un indice  $i$ , che è il numero cardinale della cella. Poi hanno una zona di memorizzazione formata da alcune righe. In esse  $a, b, \dots, e, f, \dots$  sono gli indici di altre celle del cervello. Accanto a ognuno di questi indici  $i$  delle altre celle cerebrali, vi è la potenza  $p_i$ , calcolata in base in base alla frequenza con cui la memorizzazione dell'indice si ripete.

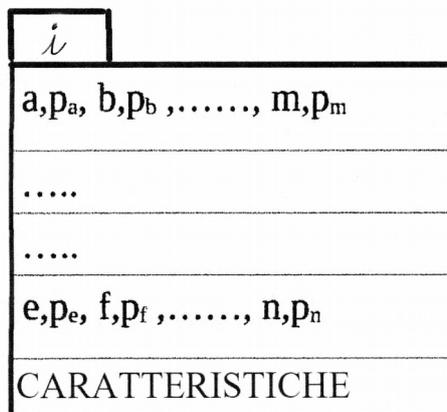


Fig. 68

Vorrei far notare che nella zona di memoria di una cella possono essere memorizzati gli indici di ogni tipo di cella del cervello, quindi, per esempio, una cella del sistema visivo può contenere in

memoria indici sia del sistema uditivo che del sistema visivo. Non così la riga delle caratteristiche; le celle del sistema visivo contengono le caratteristiche della visione, ovvero le configurazioni; le celle del sistema uditivo hanno nelle righe delle caratteristiche quelle proprie del sistema uditivo, ecc... Un tempo chiamavo livelli gli insiemi di celle relativi a un senso e anche a quello dei comandi interni al cervello. Si può dire che il richiamo delle caratteristiche di una cella ne produce l'eccitazione ma la sua eccitazione può anche essere indotta dal richiamo del suo indice. Nei modi dovuti una cella eccitata può memorizzare ed emettere quanto ha memorizzato.

.....  
.....

*Da pag. 156 a pag. 160*

timpano dell'orecchio quando riceve il suono "r". Di conseguenza il parlante profferisce il suono "r". E' pur vero che timpano e corde vocali sono degli organi distinti ma la validità concettuale del discorso non muta, è soltanto questione di opportunità costruttive. Il processo di memorizzazione è sempre lo stesso: se l'occhio viene fatto girare verso l'alto girare verso l'alto, si eccita una cella degli attuatori, per esempio la cella k. Se contemporaneamente viene pronunciata la parola "su", viene eccitata la cella parola del livello U, che ha gli indirizzi dei fonemi di "su" nella riga delle caratteristiche, diciamo che sia la cella h. La cella h memorizzerà l'indice k nella sua zona di memoria e contestualmente la cella k memorizzerà l'indice h nella sua zona di memoria. In seguito la parola udita la parola "su", l'eccitazione della cella h richiamerà la cella k, che è nel livello degli attuatori e che farà girare su l'occhio; mentre, nel caso sia l'occhio a girare in su, per esempio per seguire un dito che si sta alzando, sarà eccitata la cella k che richiamerà la cella h e l'emissione della parola "su". Vi sono poi altre celle, in analogia con le celle parola del sistema uditivo, che hanno nella riga delle caratteristiche gli indici delle celle degli attuatori, o altre ancora, superiori che hanno come caratteristiche gli indici di quest'ultime, in analogia alle celle frase. Chiamerò livello A l'insieme delle celle degli attuatori.

## **7. La memoria letterale.**

Penso che nel sistema uditivo vi siano due tipi di memoria: una che chiamerò memoria piramidale e una seconda che chiamerò memoria letterale, argomento di questo paragrafo. Supponiamo di avere memorizzato le parole del vocabolario italiano, diciamo in 5000 celle. In queste condizioni (senza interruzioni) recitiamo: La gloria di colui che tutto move per l'universo penetra..... Dicendo "La" eccito la cella che ha quei fonemi nella riga delle caratteristiche, idem dicendo "gloria", "di",... queste celle parola hanno degli indici, che suppongo abbiano rispettivamente valore 12,23,75,132,... La cella numero 12, "La", ovvero quella che ha i fonemi "La" nella riga delle caratteristiche, viene eccitata dalla parola pronunciata, ma la sua eccitazione svanisce dopo un po' di tempo, da precisarsi con considerazioni quantitative, che suppongo sia sufficiente per memorizzare gli indici delle parole "gloria" e "di" ma non il resto della frase. Quando si pronuncia "gloria", si eccita la cella che ha nella riga delle caratteristiche i fonemi di "gloria" e questa cella memorizzerà gli indici delle parole "di" e "colui", poi l'eccitazione di "gloria" cadrà e essa non sarà più capace di memorizzare. Pronunciata la parola "di" si eccita cella che ha queste caratteristiche, che memorizzerà gli indici di "colui" e di "che". Ecc... In buona sostanza ogni cella memorizza gli indici di due parole più avanti. Se una cella parola X viene eccitata fortemente dagli indici delle celle fonema, che ha nella sua riga delle caratteristiche, essa diventa capace di memorizzare per un certo lasso di tempo. Siccome in questo tempo si eccitano altre celle parola, la cella X memorizza i loro indici in una sua riga di

memorizzazione. Se si ripete la lettura, al fine di imparare il poema a memoria, il programma controlla e rileva che nella zona di memoria della cella “La” c’è una riga con gli indici delle stesse parole che si stanno pronunciando ora e rafforza la potenza della registrazione. Volendo ricordare il brano, quando le registrazioni sono memorizzate, pronunciando la sola parola “La” potrebbe verificarsi l’emissione della riga di memorizzazione più potente della cella ma se pronunciamo “La gloria”, si ha l’eccitazione della cella della parola “La”, di indice 12 e della cella della parola “gloria” di indice 23, ma quello che più conta è che l’indice della parola gloria sarà lo stimolo che farà emettere la riga di memoria della cella “La”, contenente “gloria di”. Quindi la cella 23, della parola “gloria”, se eccitata fortemente, emette stimolata dagli indici che vengono dalla cella “La”, per cui emette “di colui” o meglio gli indici 75 e 132. D’ora in avanti invece di parlare di indici userò le parole, perché risulta più immediato. Va notato che “La” ha emesso “gloria di”, la cella “gloria” ha emesso “di colui”, e quindi la cella “di” è eccitata da due emissioni originate da delle celle cerebrali, non dal decodificatore attivato da un parlante. Le eccitazioni del decodificatore sono potenti, quelle da celle cerebrali meno, tuttavia se “La” e “gloria” vengono pronunciate in modo rapido i due “di” interesseranno questa cella assommando i loro effetti e portandola ad un livello sufficiente di eccitazione e all’emissione è stimolata della sua riga che contiene “colui che”, ecc... Quindi dette due parole in ordine parte il ricordo del testo. Non importa se le due parole siano le prime o si trovino in un punto qualunque del brano memorizzato, l’importante è che siano in ordine e fanno partire il ricordo delle parole dopo di loro. Tutto questo non ha valore quantitativo: è un esempio. Le parole memorizzate nella riga di una cella potrebbero essere 4, come potrebbero occorrere 3 emissioni cellulari della stessa parola per portare la cella a un livello di eccitazione sufficiente. In fig. 69 vi è un esempio del funzionamento dell’emissione stimolata. Le celle sono 4. Nella prima riga della tabella ci sono i loro indici. L’ultima è la riga delle caratteristiche che contiene i fonemi della parola propria di quella cella. Nella seconda riga vi sono i ricordi del poema memorizzati da ogni cella, insieme a tanti altri, indicati dai puntini nella terza riga. Per semplificare il discorso nella seconda riga ho messo i nomi delle celle mentre in essa sono memorizzati gli indici. Quindi invece che scrivere nella prima cella “gloria di” sarebbe stato corretto scrivere 23, 75, volendo essere ancor più precisi con le loro persistenze. Sotto la tabella, nella prima riga vi sono le parole pronunciate da un parlante esterno, ognuna delle quali basta ad eccitare fortemente la cella. Nella seconda riga vi è l’emissione della cella 12, quella della parola “La”, cioè “gloria di”. La cella 23 è eccitata due volte: dalla parola “gloria” pronunciata e dall’indice numero 23, la prima volta fortemente perché si tratta di un segnale che viene dall’udito e la seconda volta più debolmente perché si tratta dell’emissione della cella 12. Le due eccitazioni si sommano e ne deriva una fortissima eccitazione. La cella 75 “di”, è eccitata dalle emissioni della 12 e della cella 23, eccitazioni deboli ma che sommate sono sufficienti a farla emettere a sua volta. Siccome nella memoria della cella 23 vi è l’indice della cella 132, “colui”, sarà stimolata l’emissione della riga della cella 135 che contiene l’indice di “colui”. Idem per la cella 132 “colui”, eccitata dalle emissioni delle celle 23 e 75 e la cui emissione viene stimolata da “che” presente nella cella 75 che le fa emettere “che tutto”. A questo punto il processo si svolge e si mantiene. Vorrei ancora rimarcare le due funzioni che ha ogni parola (o meglio l’indice della sua cella, che però contiene la stessa informazione) in questo sviluppo, per esempio “colui” emesso dalla cella 23 eccita la cella 132 e stimola l’emissione dello spezzone di memoria “colui che” della cella 75. La parola “colui” emessa dalla cella 75 nello spezzone di memoria eccita anch’essa la cella 132 e la rende capace di emettere, naturalmente in regime di emissione stimolata.

12	23	75	132
gloria di	di colui	colui che	che tutto
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
La	gloria	di	colui

La	gloria			parole pronunciate
	gloria	di		emissione cella 12
		di	colui	emissione cella 23
			colui	emissione cella 75
forte	molto forte	sufficiente	sufficiente	eccitazione cella

Fig. 69

Questo tipo di memoria richiede che la cella rimanga eccitata, ovvero in grado di memorizzare, mentre vengono eccitate le cellule successive. Non mi pare dunque che la memoria letterale possa riguardare le celle frasi e meno ancora le celle periodo, a meno che non si preveda di mantenerle eccitate con atto volontario e dispositivo adatto allo scopo. Potrebbe invece riguardare le celle fonema, ancor più delle celle parola per le quali ho sviluppato l'esempio. La memoria letterale è sostanzialmente asemantica, potrebbe essere formata di parole asemantiche.

## 8. La memoria piramidale.

Il nome memoria piramidale suggerirebbe il suo formarsi anche su un lungo testo, con alla base i fonemi, poi le sillabe, poi le parole, le frasi,... fin ad un ultima cella, vertice della piramide. Ci vorrebbero delle prove ma credo che le piramidi siano assai meno alte. Inoltre ritengo che il formarsi della memoria piramidale, per il piano delle frasi le cui celle hanno per caratteristiche gli indici delle celle parole, non avvenga come per cella la parola, la cui eccitazione è (anche) opera di un dispositivo attenzionale automatico. La cella frase, per esempio, deve essere mantenuta eccitata per un tempo relativamente lungo e quindi è necessario un atto di volontà. Mantenere volontariamente eccitata una cella è un grosso salto di qualità: finora ho solo parlato di automatismi e penso che l'esistenza di questa possibilità e del dispositivo che la realizza contribuisca, più di altri apparati, a spiegare la differenza fra il pensiero degli animali e quello umano. Differenza già rilevata dal Cartesio. Per memorizzare la riga delle caratteristiche di una frase occorre mantenere volontariamente la cella eccitata mentre si pronunciano le parole che sostituiscono la frase e l'inizio e la fine della frase devono avere nette pause temporali, superiori a quelle fra le parole. Durante la formazione della frase, in memoria piramidale, le parole devono essere già già formate, perché le caratteristiche della cella frase sono

.....  
 .....

*Ultime pagg. del libro*

## Indice generale

Prefazione.....	4
Capitolo I - Mondo e cervello.....	8
Premessa.....	8
1. Necessità di un modello meccanicistico del cervello in un universo che (forse) non è meccanicistico.....	8

Capitolo II - Addentellati.....	17
Premessa.....	17
1. Elementi di neurofisiologia e basi del modello per l'interpretazione del sistema visivo umano.	17
2. Elementi di matematica.....	22
3. Elementi di fisica.....	25
Capitolo III - I fondamenti della visione.....	28
Premessa.....	28
1. Luminanza e brillantezza.....	29
2. Inibizione e contorni.....	34
3. L'isolamento dell'oggetto dallo sfondo.....	47
4. La formazione dell'immagine visiva.....	51
5. Cenni sulle teorie del colore e agganci neurofisiologici.....	62
Capitolo IV - Visione periferica e visione centrale.....	74
Premessa.....	74
1. Il modello di isoconvergenza. Cenni sulla visione periferica e sulla visione centrale	74
2. Dimensioni degli oggetti. Oggetti vicini e oggetti lontani.....	82
3. Confronto fra figure e illusioni ottiche.....	85
Capitolo V – Il riconoscimento topologico delle forme.....	94
Premessa.....	94
1. La potenza degli angoli.....	99
2. Il modello a strati.....	101
3. Riconoscimento e apprendimento.....	105
4. La rete neuronale. Frammentazione della figura.....	114
5. Cenni sulla ricerca degli oggetti.....	123
6. La struttura della cella visiva.....	124
Capitolo VI – La meccanizzazione del linguaggio.....	126
Premessa.....	126
1. Il riconoscimento vocale.....	137
2. La struttura dell'area linguistica del cervello.....	138
3. Emissione spontanea e stimolata.....	141
4. La formazione dell'oggetto.....	144
5. La formazione della parola.....	150
6. Il livello A. Le celle degli attuatori.....	155
7. La memoria letterale.....	156
8. La memoria piramidale.....	160
9. Relazione fra memoria piramidale e memoria letterale.....	162
10. Il dispositivo di controllo.....	166
11. La comprensione del testo scritto.....	173
Appendice I - Complementi.....	176
1. L'apprendimento per differenze.....	176
2. Alcuni esempi.....	178