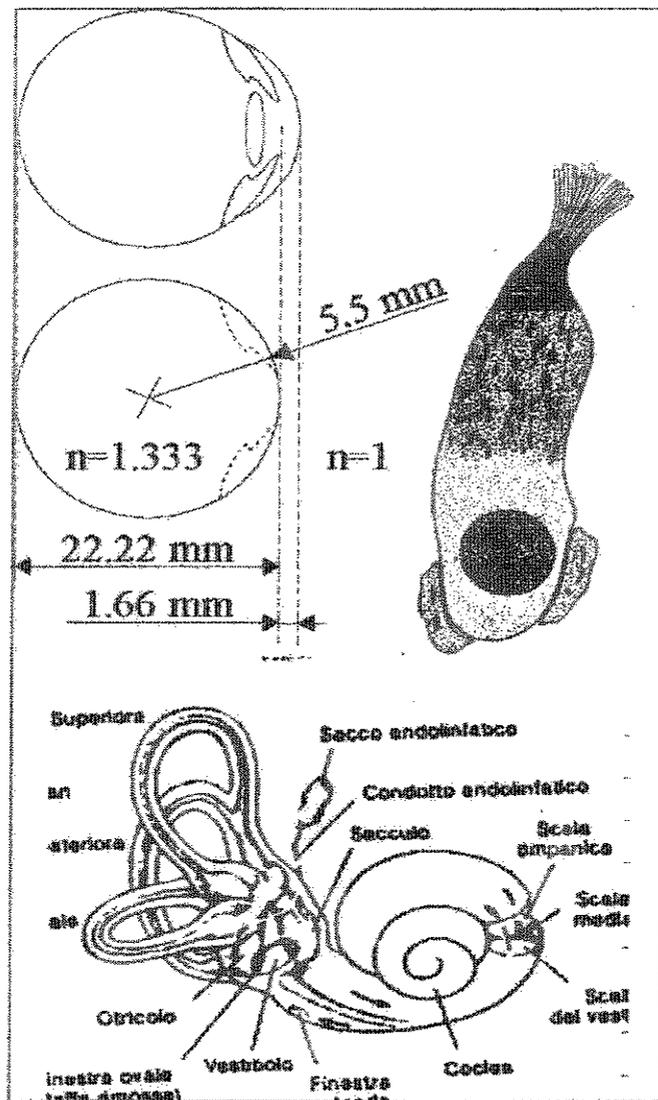


I sensi e la psicofisica



Parte III

Capitolo VI

Aspetti generali dei sistemi sensoriali

I SISTEMI SENSORIALI NATURALI

I sistemi sensoriali forniscono agli organismi viventi informazioni sull'ambiente in cui si trovano. Essi costituiscono le "interfacce" verso il mondo esterno permettendo l'adattamento degli organismi a condizioni ambientali variabili; negli organismi complessi i sistemi sensoriali forniscono informazioni anche sui processi interni, in modo tale che sia possibile controllare e modificare (volontariamente o involontariamente) le funzioni corporee. A tale proposito abbiamo i sistemi sensoriali che comprendono i tradizionali organi di senso e quindi forniscono le sensazioni esteroceettive (relative all'ambiente esterno) e quelli che forniscono informazioni di carattere propriocettivo quali il sistema vestibolare e alcuni sottosistemi del sistema somatosensoriale. Un sistema sensoriale può essere schematizzato come in figura VI.1.

Il segnale di ingresso è rappresentato dallo *stimolo specifico* del sistema sensoriale considerato (onde di pressione sonora per il sistema acustico, onde elettromagnetiche per il sistema visivo e così via). La "*parte esterna*" effettua una prima elaborazione del segnale di ingresso, senza cambiarne la natura fisica ed è costituita da organi specifici che agiscono da interfaccia col sistema nervoso (i padiglioni auricolari, il meato uditivo esterno, la catena degli ossicini e la coclea per il sistema acustico; il complesso ottico costituito dalla cornea, l'umor acqueo, il cristallino e l'umor vitreo per il sistema visivo; i canali semicircolari, l'otricolo e il sacco per il sistema vestibolare; opportuni strati cutanei per alcuni sistemi somatosensoriali ecc.). I *recettori* sono le unità che ricevono gli stimoli sia esterni

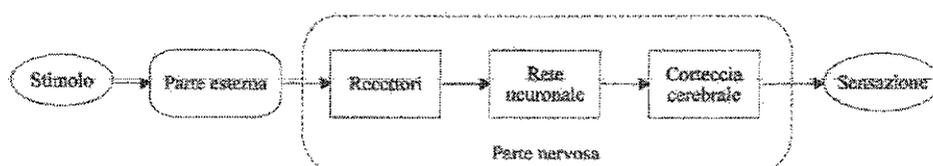


FIGURA VI.1 Schema a blocchi di un sistema sensoriale.

che interni e li trasducono in opportuni segnali elettrici che vengono inviati, mediante collegamenti sinaptici, al sistema nervoso. Il potenziale d'azione generato dai recettori viene trasmesso ad una fitta *rete neuronale* (nuclei neuronici) attraverso la quale si arriva ai neuroni posti nell'*area della corteccia cerebrale*. Il segnale di uscita è rappresentato dalla *sensazione* o *percezione*: la prima è considerata come lo stato più semplice o elementare della nostra coscienza mentre la seconda presuppone un'ulteriore elaborazione e un'integrazione con altre sensazioni.

I recettori

I recettori possono essere classificati in: *esterocettori* che ricevono stimoli dall'esterno del corpo umano; *propioceettori* che danno informazioni sulla postura e il movimento del corpo; *introceettori* che riguardano stimoli generati all'interno del corpo. Una ulteriore classificazione viene fatta in base alla natura chimica o fisica dello stimolo per cui si hanno: i *chemirecettori* che sono opportuni trasduttori che misurano proprietà e quantità chimiche; i *fotorecettori* che trasducono stimoli ottici; i *meccanorecettori* che trasducono stimoli di tipo meccanico; i *nociceettori* che forniscono al sistema nervoso sensazioni di dolore. Alcuni recettori sono fortemente specializzati; infatti sembra che esistano meccanorecettori sensibili a sforzi di taglio e altri sensibili a sforzi di compressione; si hanno poi quattro categorie di fotorecettori ciascuna sensibile a diverse bande di frequenza. Altri recettori possono invece essere sensibili a stimoli di diversa natura (soprattutto i nociceettori). I recettori devono essere selettivi per differenti stimoli fisici e chimici, inoltre devono rispondere velocemente ed essere sensibili ai cambiamenti di input, ma soprattutto è necessario che siano affidabili e non diano informazioni spurie. Tutti questi requisiti, la selettività, la velocità, la sensibilità e l'affidabilità sono strettamente interconnessi, cioè uno può essere migliorato a scapito degli altri.

SELETTIVITÀ E RISOLUZIONE

La *selettività* è la capacità dell'organo di senso di recepire solo uno o certi determinati stimoli tra i molti presenti nell'ambiente. Gli stimoli sono costituiti da segnali di tipo fisico e/o chimico. Ciascun organo di senso è sensibile a determinate grandezze chimico-fisiche (selettività a livello dell'organo) quali luce, suoni o temperatura ed è inoltre in grado di distinguere caratteristiche diverse all'interno di ciascun stimolo (ad esempio lunghezza d'onda, frequenza, durata e punto di origine per i suoni nell'udito). La selettività allo stimolo è anche la capacità di effettuare un'analisi più o meno raffinata della caratteristica in esame; questa capacità di analisi dipende sia dal numero di classi di recettori che dall'ampiezza dei campi recettivi. Per chiarire meglio questo concetto supponiamo di avere una superficie su cui sono distribuiti uniformemente n recettori ognuno dei quali è collegato al suo assone. Se tutti i recettori fossero uguali e lavorassero in parallelo avremmo un sistema altamente affidabile, in quanto il danneggiamento di $n-1$ recettori non comprometterebbe la funzionalità del sistema stesso. Tutto ciò andrebbe però a

scapito della capacità trasmissiva poiché, avendo tutti i recettori la stessa f_{MAX} trasmissibile, sarebbe possibile trasmettere un numero di livelli minore di quello ottenibile qualora avessimo a disposizione recettori diversi e quindi diverse f_{MAX} . Supponendo invece che i recettori siano divisi in classi, ognuna delle quali composta da recettori uguali, possiamo aumentare la capacità trasmissiva del sistema. Dobbiamo poi considerare il campo recettivo di ogni classe: una certa classe di recettori viene influenzata non solo dallo stimolo che la incide direttamente, ma anche da stimoli che interessano altre classi di recettori. In conclusione più classi con campi recettivi piccoli aumentano la selettività alle caratteristiche degli stimoli, ma diminuiscono la sensibilità di ciascuna classe nella rivelazione di uno stimolo, in quanto lo stimolo in esame eccita un numero minore di recettori. Pertanto in generale una migliore sensibilità va a scapito della selettività e viceversa.

La *risoluzione spaziale* è legata alla densità spaziale dei recettori e alla grandezza dei loro campi recettivi. Da essa dipende la *discriminazione spaziale*, cioè la capacità di percepire distinti due stimoli spazialmente vicini (non va confusa con la *localizzazione spaziale* che invece è una selettività alla posizione dello stimolo). Un'alta risoluzione richiede un largo numero di fibre nervose ciascuna con un campo recettivo stretto, mentre per una risoluzione scadente sono sufficienti un campo recettivo più largo e pochi recettori (ad esempio, nella retina le cellule gangliari sul bordo esterno sono rade ed hanno un campo recettivo largo, mentre al centro sono più fitte ed hanno un campo recettivo stretto, permettendo una vista acuta al centro del campo visivo e una vista meno dettagliata alla periferia di questo).

Velocità

Un'altra importante caratteristica per un sistema sensoriale è la velocità di risposta, tuttavia molti sistemi rispondono con un ritardo sorprendente (*tempo di latenza*). Questo non deve essere interpretato come una caratteristica negativa, poiché, come un campo recettivo più ampio può essere maggiormente sensibile di uno più stretto, così un meccanismo che integra nel tempo e reagisce all'energia totale dello stimolo su un lungo periodo può essere maggiormente sensibile di uno che integra su un breve periodo. Per illustrare tale comportamento si può considerare una coppia di galvanometri di identica fattura, fuorché per la forza di ritorno della molla: quello con la molla più debole sarà più sensibile, ma la lancetta impiegherà un tempo più lungo per raggiungere una lettura stabile.

Sensibilità

È stato messo in evidenza che l'alta risoluzione spaziale richiede piccoli campi recettivi e questi possono raccogliere solamente una piccola quantità di energia da stimoli applicati. Una risposta veloce richiede un breve tempo di integrazione che riduce anche l'energia utilizzabile. Per avere risposte con buona risoluzione, veloci e con alta affidabilità è richiesta un'alta sensibilità del meccanismo di ricezione, cioè un'elevata capacità del sistema di rispondere a piccole quantità di energia. Bisogna notare che l'alta sensibilità non sempre è vantaggiosa, infatti ad esempio.

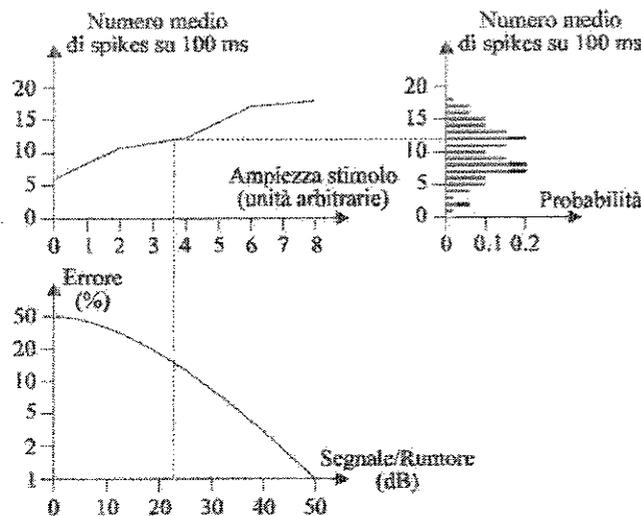


FIGURA VI.2 Rappresentazione del numero medio di spikes in 100 ms in relazione all'ampiezza dello stimolo. Nel grafico a destra è riportata la probabilità che si abbia un certo numero di impulsi e nel grafico in basso è riportata la percentuale di errore in relazione al rapporto segnale rumore.

da più di 50 s^{-1} a meno di 5 s^{-1} ; raramente è assente (per esempio, le fibre di alcuni recettori tattili sono silenti fino a che non vengono sollecitate). Se i recettori vengono eccitati con stimoli d'intensità crescente, il numero di impulsi cresce in modo lineare per piccoli range di ampiezza, poi presenta un fenomeno di saturazione, cioè la velocità d'incremento diminuisce al crescere dell'intensità. Possiamo dunque definire la sensibilità come la pendenza di questa caratteristica, cioè il numero medio di impulsi scaricati in seguito ad una sollecitazione per unità di energia applicata.

CARATTERISTICHE di FUNZIONAMENTO

Il compito del recettore è quello di trasdurre le informazioni legate ad un particolare parametro dello stimolo in informazioni codificate opportunamente. La caratteristica di funzionamento di un dato recettore può ottenersi ad esempio mettendo in entrata l'ampiezza dello stimolo ed in uscita la frequenza degli stimoli generati. Ipotizzando che lo stimolo rimanga stazionario per un tempo sufficientemente lungo durante ciascuna prova (stimolo a gradino) e che non si abbia il fenomeno della adattabilità (vedi oltre) avremo delle caratteristiche del tipo riportato in figura VI.3.

Da questa si deduce che

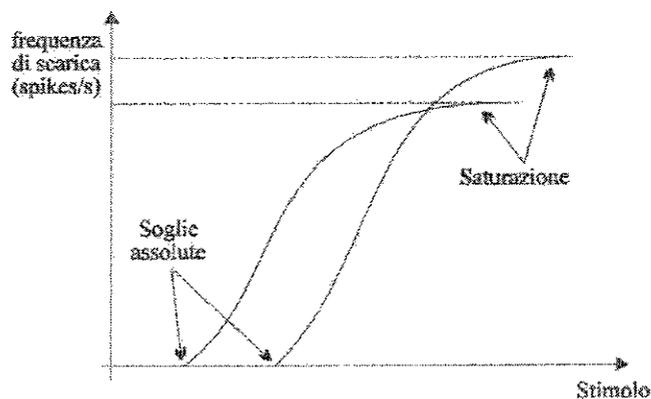


FIGURA VI.3 Caratteristiche tipiche di recettori.

un orecchio troppo sensibile potrebbe portare a sentire i rumori interni al corpo, quali: battito cardiaco, fluire del sangue, rumore dovuto ai moti browniani.

La figura VI.2 riporta il numero di impulsi emessi in 100 ms in funzione dell'intensità di uno stimolo applicato. Si noti che alcuni impulsi hanno luogo prima che lo stimolo venga applicato, questa è chiamata *scarica mantenuta*, si ha in assenza di stimolo e la sua velocità varia molto in sistemi diversi e in tipi diversi di fibre nervose (ad esempio, per singole fibre di nervo ottico varia

ogni recettore ha una *soglia assoluta*, nel senso che se l'ampiezza dello stimolo è al di sotto di tale valore, non si ha alcun impulso in uscita; ogni recettore ha una *saturazione*, nel senso che superata una certa ampiezza, non si ha un corrispondente aumento della frequenza in uscita; per uno stesso organo e per uno stesso animale, vi sono recettori che si comportano in modo diverso nei riguardi della soglia assoluta e della saturazione; la caratteristica di funzionamento è in generale non lineare a meno di considerare intervalli di funzionamento molto piccoli.

Indicando con dR la variazione di sensazione e con dS quella dello stimolo si ha la seguente relazione:

$$dR = K_1 \frac{dS}{S} \quad dS = K_1 \frac{dI}{I}$$

da cui:

$$R = K_1 \log S + K_2$$

Il legame logaritmico fra R ed S può essere attribuito al singolo recettore oppure all'insieme dei recettori da cui dipende la sensazione R .

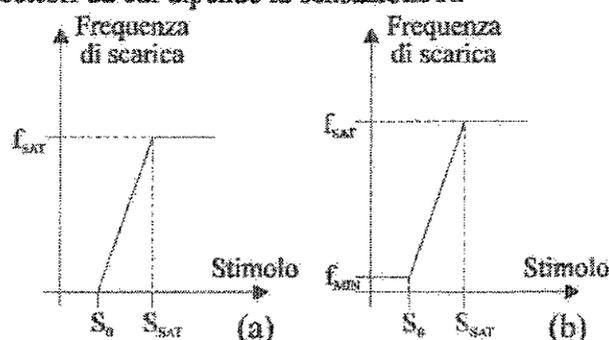


FIGURA VI.4 Caratteristiche dei recettori rappresentate in un piano semilogaritmico. (a) Caso di risposta a riposo nulla. (b) Caso di ecarica a riposo non nulla (ecarica mantenuta).

Se vogliamo studiare i recettori in un tratto della loro caratteristica avente un andamento di tipo logaritmico, possiamo usare dei grafici di tipo semilogaritmico (figura VI.4), cioè con scala lineare per gli stimoli e scala logaritmica per la frequenza di scarica del recettore. Se la funzione ha scarica mantenuta nulla si ha la funzione graficata in figura VI.4a ed espressa dalla seguente funzione a tratti:

$$f = \begin{cases} 0 & \text{se } S \leq S_0 \\ \log\left(\frac{S}{S_0}\right) & \text{se } S_0 \leq S \leq S_{SAT} \\ f_{SAT} & \text{se } S > S_{SAT} \end{cases}$$

dove f_{SAT} rappresenta il seguente valore di saturazione:

$$f_{SAT} = \log\left(\frac{S_{SAT}}{S_0}\right)$$

Molti recettori danno luogo ad una generazione di impulsi quando lo stimolo è sottosoglia; in questo caso il grafico è quello riportato in figura VI.4b e la relazione è espressa dalla seguente funzione a tratti:

$$f = \begin{cases} f_{MIN} & \text{se } S \leq S_0 \\ f_{MIN} + a \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right) & \text{se } S_0 \leq S \leq S_{SAT} \\ f_{SAT} & \text{se } S > S_{SAT} \end{cases}$$

dove f_{SAT} rappresenta il valore di saturazione:

$$f_{SAT} = f_{MIN} + a \cdot \log\left(\frac{S_{SAT}}{S_0}\right)$$

Molti recettori rispondono in modo diverso all'inizio dell'applicazione dello stimolo rispetto al funzionamento raggiunto a transitorio esaurito. Tipiche caratteristiche che mettono in risalto tale fatto sono quelle riportate in figura VI.5, dove sulle ascisse vi è il tempo trascorso dal momento della applicazione dello stimolo, sulle ordinate vi è la frequenza (istantanea) degli impulsi al secondo, ciascuna caratteristica essendo determinata per un valore costante dello stimolo (ancora di durata sufficientemente lunga). Questo fenomeno è chiamato, in fisiologia, *adattabilità*.

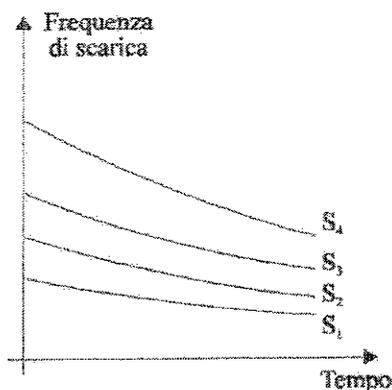


FIGURA VI.5 Caratteristiche dinamiche di un recettore. I valori della frequenza di scarica aumentano con l'aumentare dell'intensità dello stimolo ($S_1 < S_2 < S_3 < S_4$)

Un altro tipo di caratteristica importante per la determinazione del comportamento di un recettore, è quella che si ottiene considerando stimoli di valore costante S e di durata T , tali che si sia sempre nelle condizioni limite per ottenere almeno un impulso in uscita. Indicheremo con S_L il valore limite (per un dato valore di T) di S . In generale il legame tra T ed S_L è espresso da un grafico del tipo illustrato in figura VI.6. Questo grafico rappresenta cioè la coppia di valori limiti di T ed S_L tali che per questi valori si ha ancora un impulso in uscita, mentre per valori inferiori di T o di S_L o di entrambi non si ha alcuna generazione di impulso. Il valore asintotico di S riportato in figura coincide (nell'ipotesi di assenza di dinamica del recettore) con il valore di soglia assoluta riportato in figura VI.3.

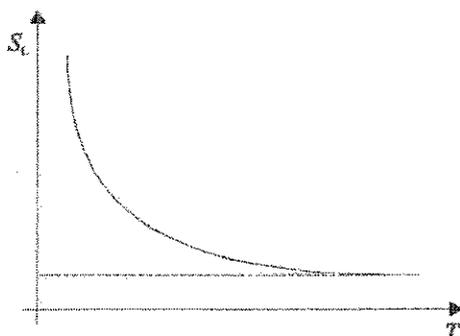


FIGURA VI.6 Andamento tipico della soglia in funzione della durata dello stimolo.

In conclusione possiamo allora classificare i recettori in: recettori che non presentano generazione spontanea di impulsi e recettori che presentano generazione spontanea di impulsi. Prendendo in esame solo i primi abbiamo: i *recettori tonici*, che non hanno il fenomeno della adattabilità, cioè che non hanno funzionamento dinamico e i *recettori fasici*, che hanno il fenomeno della adattabilità, cioè che hanno funzionamento dinamico.

Lo studio dei sensi

Lo studio dei sensi si suddivide nello studio degli aspetti più strettamente anatomici e neuroanatomici (rivolti all'identificazione ed alla definizione delle strutture nervose coinvolte nell'elaborazione del segnale d'interesse: visivo, acustico, vestibolare, somatosensoriale, ecc.) e nello studio degli aspetti fisiologici e neurofisiologici.

Studiare i sensi umani significa arrivare a calcolare le relazioni che legano gli stimoli fisici alle sensazioni percepite, si rende necessario effettuare studi in svariati campi scientifici (anatomico, istologico, fisiologico, psicofisico, fisico, biologico, chimico, ecc.). In questa ricerca sono necessarie conoscenze di anatomia e di istologia, ma il ruolo dominante nella modellistica dei sistemi sensoriali è compiuto dall'elettrofisiologia che è la scienza che studia in modo diretto il funzionamento e i meccanismi intimi dei sistemi sensoriali, legandoli direttamente alla misura dei potenziali d'azione.

Nell'uomo si considerano generalmente i sistemi sensoriali esterni, cioè quelli che gli permettono di ricevere informazioni sull'ambiente che lo circonda e che guidano il suo comportamento. Questi sistemi sensoriali sono comunemente chiamati sensi e sono complessivamente cinque: *olfatto*, *gusto*, *tatto*, *udito* e *visione*. Il volume delle conoscenze e delle ricerche è molto differente da senso a senso, soprattutto per il fatto che, in passato, alcuni di essi venivano considerati di minore importanza. Nello studio dei cinque sensi umani, la funzione di trasferimento mette in relazione input ed output molto diversi tra loro e la sua ricerca necessita di una vasta e differenziata conoscenza scientifica.

Tecniche di indagine sperimentale nell'animale

In base a quanto sopra detto i metodi di indagine sperimentale nell'animale possono essere suddivisi in tecniche di neuroanatomia e tecniche di neurofisiologia.

I metodi di neuroanatomia sono basati sulla possibilità di marcare le cellule nervose, singolarmente o a gruppi, e di poter osservare al microscopio il risultato di tale operazione. Questi metodi possono, a loro volta, essere suddivisi in metodi in vivo e in vitro, a seconda che il marcamento e l'osservazione vengano eseguiti su cellule viventi oppure no. Le tecniche impiegate sono tanto più efficaci quanto più esse risultano selettive, ossia permettono il marcamento di singoli neuroni o di gruppi morfologicamente omogenei di neuroni. Altre tecniche di indagine morfologica sono invece più orientate allo studio delle connessioni fra centri nervosi. Esse si basano o sulla degenerazione delle fibre nervose in uscita da un nucleo a seguito di lesioni localizzate nel nucleo stesso o su iniezioni localizzate di sostanze che, trasportate all'interno delle fibre nervose e successivamente rese visibili al microscopio, permettono di ricostruire le varie connessioni.

La fisiologia dei sistemi neurosensoriali, a livello sia microscopico (singoli neuroni) che macroscopico (nuclei e vie nervose), è stata analizzata impiegando tecniche di elettrofisiologia. Queste tecniche si basano sulla possibilità di registrare l'andamento temporale degli spikes generati da singoli neuroni o da insiemi di neuroni per mezzo di microelettrodi posizionati all'interno dei neuroni stessi o in prossimità di essi. La variabile misurata è il numero di impulsi al secondo rilevati

dalla sonda in relazione sia ad uno stimolo esterno di determinata ampiezza, sia ad una serie di impulsi di determinata frequenza ed intensità inviati mediante altri microelettrodi, opportunamente posizionati in sedi diverse da quelle di registrazione, ma direttamente o indirettamente collegate con essa. L'esatta posizione degli elettrodi di stimolazione e di registrazione viene determinata a posteriori inviando ad entrambi, al termine della registrazione, un impulso elettrico d'intensità tale da provocare una lesione, successivamente rilevabile al microscopio sui preparati ottenuti dall'animale sacrificato. La selettività spaziale nella registrazione è ovviamente determinata dalle dimensioni dell'elettrodo di registrazione. Un microelettrodo per registrazioni intracellulari ha una punta il cui diametro è dell'ordine del micron e ciò consente di penetrare all'interno di una cellula senza provocare danni tali da modificare la risposta. Per registrazioni extracellulari il diametro della punta dell'elettrodo è dell'ordine di qualche decina di micron. Per registrazione dell'attività di insiemi di neuroni spazialmente vicini si usano elettrodi il cui diametro può raggiungere qualche decimo di millimetro.

Naturalmente queste tecniche sono in continua evoluzione. Recentemente la produzione di anticorpi monoclonali sembra offrire la possibilità di marcare selettivamente classi di neuroni omogenei dal punto di vista funzionale. Va inoltre ricordata la recente tecnica elettrofisiologica che consente la registrazione dell'attività elettrica dei singoli neuroni e, contemporaneamente, la loro marcatura.

Metodi di indagine sensoriale nell'uomo

Le tecniche descritte nel precedente paragrafo, tutte fortemente invasive, non possono essere impiegate nell'uomo. Per l'analisi delle funzionalità dei sistemi neurosensoriali nell'uomo occorre fare riferimento a risposte rilevabili mediante elettrodi superficiali (o al più sottocutanei), a risposte soggettive legate alle sensazioni prodotte da uno stimolo sensoriale o a risposte indirette rappresentate da atti motori evocati in maniera riflessa dalla stimolazione di un organo di senso. Dalla stimolazione di uno qualsiasi di questi sistemi sensoriali si possono ottenere, in generale, tre tipi di risposta: sensazioni, potenziali evocati, ed atti motori o posturali. Le sensazioni sono risposte soggettive, che costituiscono l'oggetto di studio della psicofisica. I potenziali evocati e le risposte motorie o posturali sono, invece, risposte oggettive. I primi sono delle risposte dirette, in quanto esclusivamente legate al funzionamento dei centri nervosi attivati dalla stimolazione del sistema sensoriale in esame. Le seconde sono, invece, delle risposte indirette, in quanto sfruttano interazioni tra sistemi sensoriali e sistemi motori o posturali e si riferiscono alla uscite di questi ultimi.

La tecnica più usata è appunto quella dei *potenziali evocati*: i segnali nervosi che si propagano durante il funzionamento di un sistema sensoriale generano un campo elettrico rilevabile con misure di potenziale in opportune zone della superficie corporea, in particolare nello scalpo. I potenziali evocati vengono rilevati con un bassissimo rapporto segnale/umore e possono essere quindi registrati solo eseguendo opportune operazioni di media; essi vengono generalmente provocati utilizzando stimolazioni di tipo periodico di impulsi (clicks nel caso dei potenziali evocati acustici, flashes per quelli visivi, impulsi elettrici applicati alla cute per quelli somatosensoriali). Al fine di notare eseguire la media tra le risposte evocate

dai singoli impulsi che costituiscono lo stimolo, la frequenza di questi viene scelta in modo da ritenere valida l'ipotesi che l'intero sistema ritorni, nell'intervallo compreso tra due successivi impulsi dello stimolo, al suo stato iniziale.

Una trattazione matematica che porti alla definizione di una funzione di trasferimento tra stimolo e potenziale d'azione del singolo neurone e del nucleo neuronale nel suo insieme, affronta il problema da un punto di vista statistico. La situazione è dunque molto complessa e per la trattazione si fanno alcune ipotesi quali la invarianza nel tempo della risposta all'eccitazione di ogni componente del sistema, quando, in realtà, abbiamo il fenomeno dell'adattamento; il comportamento lineare dei singoli neuroni e nuclei, quando esso è intrinsecamente non lineare; la risposta del nucleo come cumulativa delle risposte dei singoli neuroni quando, in realtà, non si può fare una semplice somma degli effetti a causa delle reciproche influenze tra i nuclei e del fatto che, in realtà, neuroni di uno stesso nucleo non hanno una perfetta omogeneità di funzioni e un funzionamento perfettamente parallelo.

I potenziali evocati risultano ovviamente dalla composizione dei campi elettrici generati dai singoli nuclei o aree corticali. Tenuto conto della diversa posizione spaziale dei generatori, del loro diverso orientamento e della non omogeneità dei mezzi interposti tra generatori ed elettrodi, si può facilmente intuire quanto complessa da analizzare sia l'informazione contenuta nei potenziali evocati. I potenziali generati sulla superficie corporea sono poi in generale molto deboli, dell'ordine di grandezza, a seconda dei casi, di qualche microvolt o di qualche decina di microvolt. Ad essi si sovrappongono i potenziali dovuti alla normale attività elettroencefalografica, il cui ordine di grandezza è quello dei millivolt. A perturbare ulteriormente la misura dei potenziali evocati possono infine aggiungersi altre sorgenti di rumore, legate, in generale, ad attività di tipo mioelettrico.

Accenniamo poi a due problemi di localizzazione, che costituiscono altrettanti aspetti fondamentali dello studio dei sistemi neurosensoriali: la *localizzazione delle funzioni* e le *localizzazione delle lesioni*. La prima consiste nell'individuare la funzione svolta da ciascuna parte del sistema sensoriale in esame in condizioni naturali di funzionamento o, per lo meno, in particolari situazioni sperimentali di laboratorio. Il secondo consiste nello stabilire una corrispondenza tra anomalie eventualmente riscontrate nelle risposte oggettive o soggettive prese in esame e la presenza di lesioni in determinate parti del sistema. La risoluzione di questo problema non soltanto in senso statistico sulla base di statistiche più o meno complete, è fortemente condizionato dalla soluzione del problema della localizzazione delle funzioni, in particolare, quando vogliamo correlare i risultati ottenuti in prove obiettive con quelli desunti da prove soggettive di psicofisica.

I SISTEMI SENSORIALI ARTIFICIALI

I sensi naturali trasducono gli stimoli fisici in segnali di tipo elettrico e per svolgere tale compito presentano caratteristiche molto sofisticate. Questa particolarità ha destato l'interesse di quel gruppo di ingegneri e scienziati che si

occupano della realizzazione di dispositivi artificiali che trasducono gli stimoli fisici in segnali elettrici o in generale che trasducono un segnale in un altro: i *sensori*.

Sono stati realizzati vari tipi di sensi artificiali non solo per applicazioni di tipo industriale quali la produzione di robots che lavorano in ambienti non strutturati, ma anche per molte applicazioni nel campo della medicina chirurgica, come la teleoperazione, e nel campo della riabilitazione. La possibilità di sostituire canali sensoriali umani o di costruire protesi molto simili alle parti umane rappresenta uno dei traguardi più ambiziosi di questa branca della bioingegneria. In particolare negli ultimi tempi, si cerca non solo di replicare le prestazioni nell'uomo, ma anche di rispettare la struttura ridondante, distribuita e in generale, in termini ingegneristici, scarsamente efficiente. Infatti il concetto di ottimo in ingegneria è diverso rispetto a quello in natura: in ingegneria si tende ad "usare il meno possibile" e a "spendere il meno possibile" mentre la natura opera in modo ridondante.

La realizzazione di un senso artificiale presuppone in primo luogo la conoscenza del senso naturale in termini anatomici fisiologici e di prestazioni in modo tale da poter realizzare un modello a "pareti trasparenti" che replica il sistema di studio sia in termini di segnali di ingresso e uscita che di struttura interna (ad esempio i sensori di De Rossi, in cui vengono replicati gli strati di epidermide e derma). Questo però non è sempre possibile; si può allora ricorrere al modello di tipo "black box" che è equivalente al sistema dato in termini di ingressi e uscite, ma che non necessariamente è costituito allo stesso modo al suo interno (ad esempio i sensori di odore a polimero: hanno banda larga come i recettori olfattivi, ma si guardano bene dall'assomigliargli).

Poiché l'elettronica di acquisizione, filtraggio, elaborazione e controllo è ormai da tempo consolidata, i problemi, e gli sforzi maggiori risiedono nella realizzazione dei trasduttori. A tale proposito i problemi basilari da affrontare sono molti:

- Quale effetto fisico usare per la trasduzione?
- Quale materiale scegliere?
- Come configurare l'insieme?
- Come dimensionarlo?

Tutte queste scelte dipenderanno dai parametri che il sensore deve misurare, da considerazioni ed esigenze riguardanti la linearità del sistema, dalla banda, il range massimo e minimo di misura desiderati, dall'ottimizzazione della selettività e sensibilità, dall'eliminazione di effetti spuri ecc.

PSICOFISICA: Introduzione e sviluppo storico

Nel panorama della scienza psicologica, quello della percezione è stato un ambito d'indagine privilegiato, che ha avuto illustri precedenti nell'ambito della discussione filosofica sin dai tempi antichi.

La nascita della psicologia è stata accompagnata dallo sviluppo di metodologie di misurazione dei fatti mentali che hanno agevolato la trasformazione dello studio dell'esperienza in disciplina scientifica. Se da un lato la misurazione della rapidità nell'esecuzione di compiti fu possibile grazie allo studio dei **tempi di reazione** introdotto dal fisiologo olandese Donders nella seconda metà dell'Ottocento, un altro importante apporto metodologico fu quello dell'introduzione di metodi per la **quantificazione delle sensazioni**. Questo settore di ricerca, che nella sua globalità prende il nome di **psicofisica**, ebbe inizio con l'idea del tedesco Gustav Theodor **Fechner** di trasformare in legge matematica un rapporto scoperto nel 1834 dal compatriota Ernst Heinrich **Weber** che esprimeva con l'equazione $\Delta R = kR$, il rapporto tra il valore R della stimolazione (dal tedesco *reiz*, stimolo) e il valore ΔR da aggiungere (o togliere) alla stimolazione per far sì che la sensazione soggettiva nel passaggio da una stimolazione di intensità R ad una di intensità $R + \Delta R$ (o $R - \Delta R$) corrispondesse ad una sensazione soggettiva di cambiamento. Si immagini ad esempio di soppesare

un mattone di un kilogrammo (R). Al mattone dovremo aggiungere un certo peso aggiuntivo (ΔR) per avvertire un minimo aumento di pesantezza. In questo esempio la **frazione di Weber** ($\Delta R/R$) è il rapporto tra il peso aggiuntivo ed il peso di partenza, e l'importante contributo di Weber fu quello di appurare che tale rapporto non cambia al variare dello stimolo R . La costante k (detta **costante di Weber**) esprime questo rapporto: tanto maggiore è il valore oggettivo della stimolazione R , tanto più essa andrà aumentata (o diminuita) per provocare un cambiamento nella sensazione soggettiva corrispondente, e questo rapporto tra R e la quantità da aggiungere (o togliere) ΔR è costante ed è uguale a k . Ogni attributo soggettivamente "misurabile" in una data modalità sensoriale possiede un valore specifico di k , ad esempio per l'intensità sonora (il "volume") di altezza media esso è pari a 0,1 e per la sensazione di pressione tattile esso è pari a 0,14. Fechner non fece altro che utilizzare la relazione tra stimolo ed incremento necessario ad avvertire un cambiamento, espressa dalla legge di Weber, assumendo che sia l'intensità della stimolazione che quella della sensazione fossero dimensioni quantificabili e riconducibili alle leggi del calcolo infinitesimale, ovvero dell'analisi matematica. Tradotto in termini più concreti, egli assunse che le soglie differenziali studiate da Weber (e note anche come differenze appena percepibili o **just noticeable differences, JND**) avessero un valore unitario nella dimensione quantitativa della sensazione soggettiva. Attraverso questa assunzione e alcuni passaggi matematici, Fechner giunse all'equazione $S=k \log I$, ove S è il valore della sensazione, k è la costante di Weber, e I è il valore dell'intensità fisica, misurabile attraverso uno strumento. Tale relazione matematica è nota come **legge di Weber-Fechner**, in

quanto poggia sia sulla validità della costante di Weber che sull'intuizione avuta da Fechner sul rapporto tra la sensazione e l'intensità fisica. Si tratta di una relazione di tipo logaritmico, basata cioè su di una funzione matematica che lega incrementi di valore costante nel dominio della sensazione ad incrementi in progressione geometrica nell'ambito della stimolazione fisica. Invertendo i termini della descrizione potremmo dire che incrementi di valore costante nel dominio dell'intensità fisica oggettiva corrispondono ad incrementi sempre più piccoli dell'intensità della sensazione soggettiva.

Per esemplificare ciò, assumendo una scala di intensità fisiche come i pesi riportati nella seguente tabella e sapendo che la costante di Weber per la sensazione di pesantezza è pari a 0,02, la legge di Weber-Fechner permette di esprimere il valore della sensazione (espressa qui in unità arbitrarie) come i valori riportati nella seconda riga della tabella. Si vede come ad aumenti costanti (di 1 kg) nella riga dei pesi non corrispondano aumenti costanti delle unità arbitrarie della sensazione calcolate con la legge logaritmica di Weber-Fechner: se un peso di 12 kg è sei volte un peso di 2 kg dal punto di vista della oggettiva misurazione fisica, il valore (arbitrario) soggettivo calcolato di 0,021 non è certo sei volte il valore calcolato di 0,006.

2kg	3kg	4kg	5kg	6kg	7kg	8kg	9kg	10kg	11kg	12kg	13kg	14kg
0,006	0,009	0,012	0,014	0,015	0,017	0,018	0,019	0,02	0,025	0,021	0,022	0,023

Messi in un grafico, i valori calcolati si distribuiscono secondo una curva che come vediamo bene non è affatto lineare, bensì cresce in modo progressivamente sempre più lento all'aumentare (costante) del peso fisico. Detto diversamente, aumenti costanti della sensazione di pesantezza si ottengono con valori sempre maggiori del peso fisico sollevato.

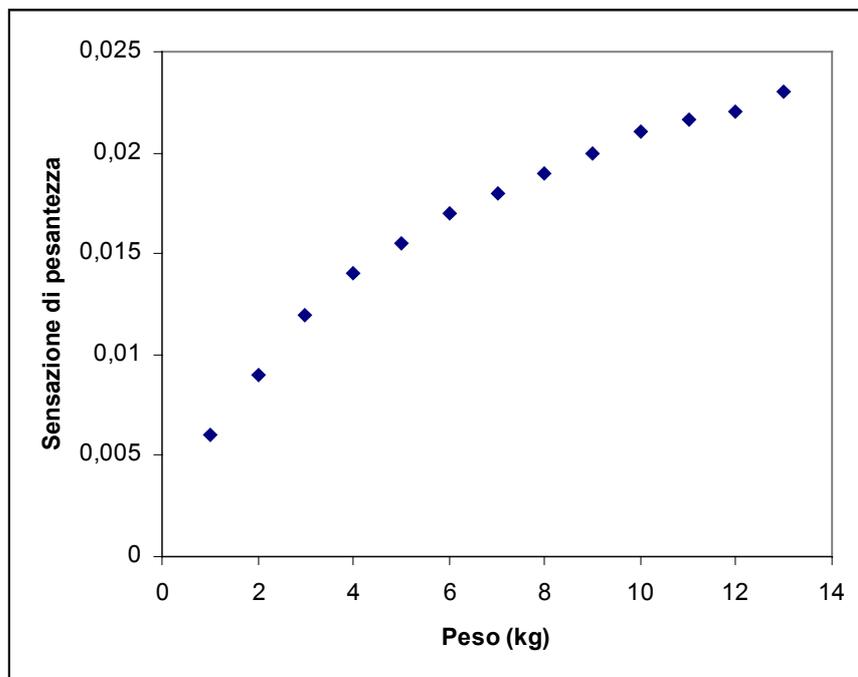


Grafico che mette in relazione l'intensità fisica di pesi sollevati (misurati in kilogrammi) e l'intensità soggettiva della pesantezza, calcolata attraverso la legge di Weber-Fechner ed espressa in un unità di misura arbitraria. Come si può vedere, aumenti graduali e costanti del peso fisico si accompagnano ad aumenti via via sempre più deboli della sensazione di pesantezza.

Con la scoperta del rapporto di Weber e della legge di Weber-Fechner, ed il contemporaneo sviluppo di metodologie di laboratorio per la misurazione delle **soglie di sensazione** (vedi sezione

successiva), la psicofisica si affermò solidamente come subdisciplina a sé stante, nonostante le numerose critiche che Fechner ottenne da più parti (tra gli altri dai filosofi Henri Bergson e Alexius Meinong). D'altra parte la legge di Weber-Fechner ebbe degli illustri precedenti, nel senso che ben prima di Fechner furono fatti dei tentativi di mettere in relazione misure di tipo fisico con grandezze soggettive. Precisamente, queste ebbero luogo in ambito economico (con la scoperta da parte del matematico svizzero Bernoulli della relazione tra capitale di partenza e fortuna percepita al gioco d'azzardo) ed astronomico (con lo sviluppo di scale di 'magnitudo stellare' che rendessero conto della luminosità delle stelle percepita ad occhio nudo).

Fechner, oltre a stabilire la fondamentale legge logaritmica che reca il suo nome, fu il primo ideatore di procedure sperimentali volte alla misurazione delle sensazioni. Si potrebbe anzi dire che il suo interesse per le variazioni minime della sensazione, le soglie, lo portò a sviluppare due metodi fondamentali della psicofisica, e che queste procedure sperimentali gli permisero di elaborare la legge teorica che porta il suo nome. La psicofisica fechneriana si proponeva infatti di quantificare le soglie, cioè 1) quei valori dell'intensità fisica di una data stimolazione che permettono di rilevare *la presenza* di quella stimolazione in una data modalità percettiva (**soglie assolute**) e 2) quei valori di intensità fisica che permettono di rilevare *una differenza* nell'intensità delle sensazioni corrispondenti a due segnali separati nel tempo o nello spazio (le **soglie differenziali** o **JND**). Una soglia assoluta corrisponde, in ciascuna modalità, al minimo quantitativo di energia rilevabile dal

sistema sensoriale (l'insieme dei recettori che costituiscono l'organo di senso) che soggiace a quella modalità. Nella modalità visiva, ad esempio, l'insieme dei fotorecettori sensibili alla luce presenti sulla retina umana permettono la rilevazione di un quantitativo minimo di energia luminosa pari alla fiammella di una candela posta a cinquanta chilometri di distanza in una notte limpida e senza luna. Questa è una definizione molto poetica, però è possibile quantificare con precisione la soglia assoluta per la luminosità, in laboratorio, utilizzando una luce puntiforme di intensità regolabile e misurandone il valore strumentale in un'unità di misura convenzionale (in questo caso il lux). Una soglia differenziale, come nel caso del mattone proposto sopra, è sempre una quantità minima di energia, ma in questo caso il minimo è relativo e non assoluto, perché si intende che tale energia debba sommarsi o sottrarsi ad una quantità di energia di partenza per ottenere una sensazione di cambiamento. Un concetto molto importante della psicologia della percezione implicito in queste definizioni basilari, è che la percezione è sempre “percezione di differenze”. Le soglie rendono conto dei salti minimi (cioè le differenze o le somme) di energia necessari per avvertire il cambiamento “dal nulla a qualcosa” o viceversa (soglie assolute) e da qualcosa a qualcos'altro (soglie differenziali).

Dire che la percezione è “percezione di differenze” significa cioè che il caso “estremo” di una stimolazione costante, omogenea ed indifferenziata nello spazio e nel tempo si accompagna ad un'assenza di percezione: è il caso del cosiddetto *Ganzfeld* (dal tedesco “campo totale”), cioè una situazione studiata nell'ambito della percezione visiva e consistente nell'esporre un soggetto ad una

stimolazione visiva indifferenziata, ponendolo cioè di fronte ad una superficie omogeneamente illuminata che si estende su tutto il campo visivo e anche oltre i suoi margini più periferici (ad esempio un enorme schermo bianco retroilluminato viene osservato dal soggetto seduto a breve distanza da esso). La sensazione ottenuta con questa stimolazione è quella di una nebbia che avvolge totalmente il soggetto. Tale nebbia è dotata di scarsa profondità ed è priva di articolazione: in essa lo sguardo cerca inutilmente dei punti di riferimento. Si capisce come in queste condizioni, anche un banale punto luminoso appena sopra la soglia (per l'appunto una minima differenza rispetto ad una totalità omogenea) costituirebbe un importante "appiglio" per lo sguardo. In sua assenza, tuttavia, il rendimento percettivo è quello di un vuoto riempito di luce, che induce nell'osservatore un senso di fastidioso smarrimento.

Altra condizione interessante per esprimere il concetto di "percezione delle differenze", è la cosiddetta "stabilizzazione dello sguardo". In questa procedura, tecnicamente un po' più complessa, il soggetto guarda un monitor di computer che raffigura un certo stimolo (ad esempio un disco rosso su sfondo bianco). Una telecamera collegata allo stesso computer e puntata sul volto del soggetto registra in tempo reale la posizione degli occhi (attraverso piccoli specchietti applicati sulla cornea, oppure analizzando l'immagine in modo digitale) e questa informazione viene elaborata in tempo reale allo scopo di spostare la posizione del disco rosso sul monitor del computer osservato dal soggetto, in modo che il suo sguardo cada sempre sullo stesso punto di questa immagine. In altre parole, i movimenti oculari del soggetto (sia volontari che involontari) vengono "inseguiti" dallo

stimolo e l'immagine visiva che colpisce la retina nel tempo è sempre identica a sé stessa. Il soggetto non percepirà nulla, a riprova del fatto che per percepire "qualcosa" devono essere presenti delle differenze, e in questo caso esse vengono annullate nel tempo, nonostante lo stimolo presenti una disomogeneità nelle dimensioni dell'intensità (bianco/rosso) e spaziali (il rosso sta nel disco ed il bianco sullo sfondo).

La percezione in condizioni naturali, ovviamente, offre questo tipo di esperienze in situazioni estremamente rare. L'input sensoriale della nostra esperienza del mondo è quasi sempre articolato e differenziato, e questo garantisce che noi si possa percepire quel che ci circonda in modo efficace e funzionale alla sopravvivenza. Volendo tracciare una distinzione sia concettuale che operativa tra sensazione e percezione potremmo dire che la sensazione è la registrazione delle differenze di energia (soglie), mentre la percezione è l'organizzazione di queste differenze minime in strutture dotate di rapporti (gli oggetti, gli eventi, ecc.). L'aspetto concettuale della distinzione sta proprio nella dicotomia tra differenza e rapporto: più differenze (semplici) costituiscono configurazioni complesse dotate di rapporti tra le loro parti e di rapporti con altre configurazioni. L'aspetto operativo risiede invece nella distinzione tra contenuti: le soglie sono gli elementi minimali sul versante della sensazione, mentre gli oggetti, i volti, le voci, e tutti i fatti dell'esperienza costituiscono il contenuto della percezione. Ovviamente, lo psicologo interessato a comprendere il modo in cui si organizzano le esperienze percettive complesse non può prescindere dalla conoscenza degli eventi più semplici ed elementari, come le soglie e le leggi della sensazione.

Tornando a Fechner, a lui sono attribuiti due dei principali metodi “classici” della psicofisica, vale a dire il metodo dei limiti e quello degli stimoli costanti. Il **metodo dei limiti** è un metodo di misurazione delle soglie nel quale è previsto che al soggetto vengano presentati, intervallati da delle pause temporali, degli stimoli di intensità progressivamente crescente o decrescente (a gradini di valore minimo) fino a che il soggetto non riferisce di avvertire un cambiamento. Lo sperimentatore può fornire al soggetto uno stimolo di intensità avvertibile (nettamente sopra il valore di soglia, o sovraliminare) e procedere a ridurlo di intensità a piccoli passi (serie discendente), chiedendo ad ogni passo se il soggetto continua ad avvertire qualcosa. Nel momento in cui si verifica la transizione viene interrotta la serie di presentazione e si registrano i due valori dell'intensità della stimolazione corrispondenti ai due valori di transizione (l'ultimo percepito e il primo non più percepito), calcolandone la media. La procedura può successivamente riprendere partendo da un valore di intensità dello stimolo nettamente inferiore al valore di soglia (subliminare) e procedendo per aumenti dell'intensità dello stimolo per passi costanti e di valore minimo (serie ascendente). Anche in questo caso lo sperimentatore chiede al soggetto, ad ogni passo, di riferire se avverte qualcosa. Quando il soggetto, dopo un certo numero di passi, riferisce di avvertire qualcosa, la procedura si interrompe e vengono registrati i valori di transizione (l'ultimo non percepito ed il primo percepito) calcolandone la media. Quando saranno state effettuate un certo numero di presentazioni crescenti e decrescenti, ottenendo cioè un certo numero di transizioni e di valori medi associati ad esse, il calcolo finale della soglia consisterà nel calcolare il valore medio di tutti i valori

medi di transizione delle varie serie. Questo metodo, un po' laborioso e piuttosto soggetto a problemi di adattamento (la tendenza dei sistemi sensoriali a livellare verso il basso le proprie risposte in conseguenza della presentazione ripetuta nel tempo degli stimoli), prevede inoltre che lo sperimentatore abbia già un'idea del valore di soglia, e di conseguenza possa determinare i valori di partenza delle serie ascendenti e discendenti in modo da evitare di partire da valori troppo subliminari o troppo sovraliminari.

	1	2	3	4	5	6	7	8	# Sequenza
Intensità	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	
105	S						S		
104	S		S		S		S		
103	S		S		S		S		
102	S		S		S		S		
101	S		S		S		S		
100	S	S	S	S	S		S		
99	S	N	S	N	S	S	S		
98	N	N	S	N	N	N	N	S	
97		N	N	N		N		N	
96		N		N		N		N	
95		N		N				N	
Transizioni	98.5	99.5	97.5	99.5	98.5	98.5	98.5	97.5	

SOGLIA:
MEDIA
98.5

Esempio di metodo dei limiti con otto presentazioni sia discendenti che ascendenti, in cui degli stimoli di intensità diverse (colonna di sinistra, espressi in unità arbitrarie) vengono rilevati oppure no dal soggetto (S: rilevazione, N: nessuna rilevazione). Per ogni serie si ottiene la media tra i due valori della transizione SN o NS: la media di tutti gli otto valori rappresenta il valore di soglia.

Un metodo alternativo per la misurazione delle soglie è chiamato **metodo degli stimoli costanti**, anch'esso introdotto da Fechner e consistente nella presentazione di stimoli di intensità diversa sopra e sotto la soglia presunta (come nel metodo dei limiti) ma con la peculiarità che nel metodo

degli stimoli costanti gli stimoli non vengono presentati in serie crescenti o decrescenti, bensì in ordine sparpagliato, casuale. Il nome “stimoli costanti” sta ad indicare che al soggetto vengono presentati tutti gli stimoli delle varie intensità, ciascuno per un certo numero (costante) di volte. L'accorgimento della presentazione in modo casuale delle varie intensità garantisce che il soggetto sottoposto a tale tipo di procedura non commetta errori di anticipazione, cioè che non “tiri ad indovinare” cosa percepirà nella prova successiva, come può accadere quando si ricorre al metodo dei limiti basato su serie crescenti o decrescenti, ed inoltre permette di evitare parzialmente il problema dell'affaticamento sensoriale presente anch'esso nel metodo dei limiti. È però un metodo piuttosto laborioso e lungo da applicare. Il calcolo delle soglie nel metodo degli stimoli costanti viene svolto una volta raccolte tutte le risposte del soggetto all'intero insieme degli stimoli. Immaginando di avere un certo numero di intensità fisiche e di aver presentato ciascuna di esse per un certo numero N di volte, si dovrà calcolare la proporzione di risposte affermative date dal soggetto per ogni livello di intensità fisica. Queste variano da un minimo di zero ($0/N=0$) ad un massimo di uno ($N/N=1$). Questi valori verranno messi in relazione in un grafico con i valori stessi dell'intensità degli stimoli presentati, grafico che prende il nome di **funzione psicometrica**. La soglia verrà calcolata andando a tracciare la linea che taglia l'asse delle proporzioni delle risposte affermative sul valore di $0,5$ ($N/2$), intercettando la funzione psicometrica e determinando il valore di intensità fisica corrispondente sull'asse delle intensità.

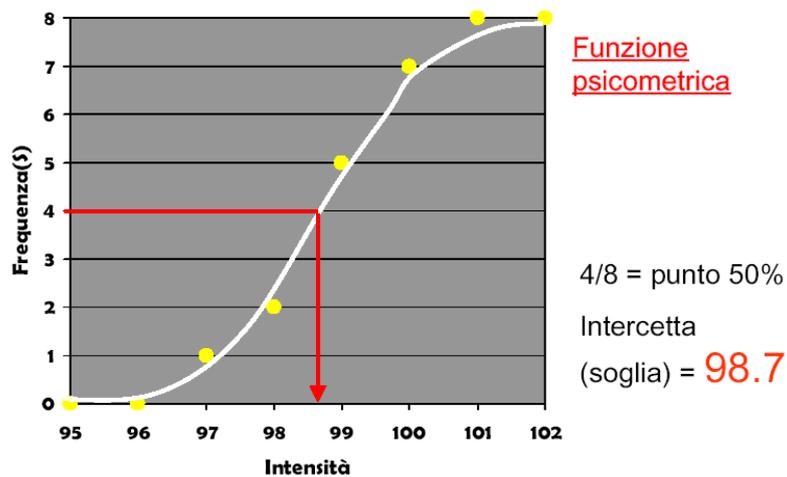
Intensità	1	2	3	4	5	6	7	8
105								
104								
103								
102								
101	S	S	S	S	S	S	S	S
100	S	N	S	S	S	S	S	S
99	N	S	S	S	N	S	N	S
98	S	N	N	S	N	S	N	N
97	N	N	N	S	N	N	N	N
96	N	N	N	N	N	N	N	N
95	N	N	N	N	N	N	N	N

Risposte S

8/8
8/8
7/8
5/8
3/8
1/8
0/8
0/8

Grafico

Esempio di metodo degli stimoli costanti con otto stimoli fisici (i valori 95-102 della colonna di sinistra) ed otto ripetizioni della presentazione di ciascun stimolo: si tenga presente che gli stimoli vengono presentati in ordine casuale. La proporzione delle risposte affermative emesse in concomitanza di ciascun stimolo viene rappresentata nel grafico successivo.



Funzione psicometrica che mette in relazione le intensità fisica degli stimoli e la proporzione delle risposte affermative riportate nell'esempio della figura precedente. La soglia si ottiene intercettando la funzione a partire dal valore medio sull'asse delle risposte e andando a proiettare l'intercetta sull'asse delle intensità.

Un altro metodo di misura delle soglie, il **metodo dell'aggiustamento**, presenta invece il grande vantaggio di essere rapido da applicare. In questo metodo, diversamente dai metodi dei limiti e

degli stimoli costanti, il soggetto non viene sottoposto alla presentazione passiva (ordinata o casuale) di stimoli decisi dallo sperimentatore, ma ha un ruolo attivo: deve infatti modificare (“aggiustare”) in prima persona l’intensità della stimolazione agendo su un apposito strumento (manopola, cursore, tasti di computer, ecc..) e interrompere questa operazione di “aggiustamento” quando percepisce un cambiamento. Anche in questo caso, come nel metodo dei limiti, la direzione della modifica può essere di tipo crescente oppure decrescente: il soggetto, cioè, aumenta o diminuisce il valore dell’intensità. La misura della soglia con il metodo dell’aggiustamento è quindi più immediata, consistendo nella semplice verifica dei valori di intensità ai quali il soggetto arresta il proprio agire sullo strumento. Per contro, questo metodo presenta il grave svantaggio essere soggetto al problema dell’affaticamento cui si è accennato sopra nel caso del metodo dei limiti.

Quando una certa modalità sensoriale può venir descritta da più di un attributo fisico (ad esempio nel dominio acustico, la frequenza e l’intensità) si può mettere in relazione il valore della soglia assoluta per uno dei due attributi, al variare dell’altro attributo, ottenendo quella che viene definita **funzione psicofisica**.

La psicofisica, a partire da Fechner, andò incontro ad una lunga evoluzione, che vide l’introduzione di nuove idee e metodologie, tali da renderla una disciplina a tutt’oggi ancora molto vitale. Si possono tuttavia identificare alcuni capisaldi principali nella storia della psicofisica dopo Fechner. Uno di questi fu l’introduzione, negli anni ’20 del secolo scorso, della “**legge dei giudizi**

comparativi”, formulata dall’americano Lewis **Thurstone** assieme ad un metodo di misurazione che non era volto alla quantificazione delle soglie di sensazione ma ad ordinare quantitativamente un certo numero di elementi, ad esempio degli stimoli visivi. Dal punto di vista psicologico, questo metodo (noto come metodo del **confronto a coppie**) prevedeva che gli stimoli dell’insieme venissero tutti presentati a due a due (formando cioè tutte le possibili coppie di elementi a partire dall’insieme dato) e che il soggetto sperimentale esprimesse un giudizio molto semplice, cioè quale dei due elementi in ciascuna coppia presentava in maggior (o minor) misura una data caratteristica. La legge dei giudizi comparativi permetteva, sulla base dei dati ottenuti con tutte queste comparazioni di coppie, di giungere ad ordinare gli stimoli lungo la dimensione studiata, da quello che meno presentava la caratteristica in esame a quello che la presentava di più.

Un secondo e importante sviluppo della psicofisica fu introdotto da S.S. **Stevens**, psicologo americano che a partire dagli anni ‘30 del secolo scorso mise a segno una serie di critiche alla psicofisica di Fechner, critiche basate sul fatto che Fechner contemplava principalmente un metodo di quantificazione delle sensazioni di tipo indiretto, votato alla scoperta delle soglie di sensazione sulla base di giudizi di tipo “assente/presente” oppure “sì/no”. La legge psicofisica logaritmica di Weber-Fecher si poteva costruire soltanto sulla base della misurazione delle soglie differenziali e sull’assunzione che esse corrispondessero all’unità di misura nell’asse della sensazione: agli occhi di Stevens, questo appariva esageratamente macchinoso sul piano pratico, ed anche un po’ inutile su quello teorico. Stevens ideò una serie di metodi di misurazione in cui i soggetti non dovevano

meramente identificare la presenza o assenza di stimolazione oppure la presenza o assenza di un aumento della stimolazione (rispettivamente soglia assoluta e soglia differenziale), ma dovevano assegnare direttamente dei valori numerici agli stimoli che venivano presentati. Questo approccio, che prende il nome di **psicofisica diretta**, fa leva sul fatto che la quantificazione delle sensazioni è un processo che ciascun soggetto può svolgere autonomamente, perché le grandezze fisiche corrispondono normalmente a dei valori psicologici e questi possono venir comunicati direttamente. I principali metodi sviluppati da Stevens furono tre. Il primo è quello della **magnitude estimation (stima di grandezza)**, in cui il soggetto deve attribuire dei valori numerici agli stimoli, noti che siano i valori estremi dell'insieme, cioè il cosiddetto **modulo** (ad esempio al soggetto vengono mostrati lo stimolo più piccolo e quello più grande e gli viene detto che essi hanno valore di 1 e di 100). In questo metodo psicofisico il soggetto deve cioè assegnare dei numeri agli stimoli che gli vengono presentati. Il secondo metodo è quello della **magnitude production (produzione di grandezza)**, nel quale al soggetto viene offerto un valore numerico e deve scegliere (regolandone l'intensità come nel metodo dell'aggiustamento, o scegliendolo tra un certo numero di alternative) lo stimolo fisico corrispondente a quel valore. In questo metodo, al contrario della *magnitude estimation*, il soggetto deve accoppiare degli stimoli fisici ai numeri che gli vengono presentati. Nel terzo metodo, detto **crossmodal matching (matching intermodale)**, al soggetto vengono presentati gli stimoli in una certa modalità (ad esempio acustica) e deve esprimere il proprio giudizio sull'intensità di questi non tanto assegnando dei numeri (come nella *magnitude estimation*) ma

scegliendo uno stimolo fisico di intensità soggettivamente corrispondente in un'altra modalità sensoriale (ad esempio visiva). Per fare un esempio di *crossmodal matching*, si immagini di dover valutare l'intensità soggettiva della temperatura ambientale, regolando l'intensità luminosa di una lampadina (tanto più caldo si percepisce, quanto più si aumenterà la luminosità della lampadina attraverso una manopola).

Questi metodi furono solo alcune delle novità introdotte da Stevens nella psicofisica: un'altra importante idea fu quella di rielaborare la legge di Weber-Fechner sulla base dei risultati ottenuti con i metodi diretti da lui escogitati. Stevens giunse ad una legge della sensazione che matematicamente "incorporava" quella di Weber-Fechner, trattandosi di un'equazione (per l'appunto detta **legge di Stevens**) basata su di una funzione esponenziale: $\Psi = k I^n$, dove Ψ è l'intensità soggettiva della sensazione, e si assume che essa abbia un valore pari al valore dell'intensità fisica I elevato alla potenza n e moltiplicato per il valore k . Questi due ultimi valori, k ed n , sono valori specifici per modalità sensoriale e si può dire che la legge di Stevens incorpora quella di Weber-Fechner per valori dell'esponente n che siano inferiori a 1, caso in cui l'equazione è espressa in termini logaritmici. Tale caso è quello di tutte le modalità sensoriali in cui la variazione dell'estensione possibile è talmente grande da dover venir "compressa" attraverso la funzione logaritmo (proprio come nel grafico visto sopra), come la luminosità ambientale nella modalità visiva o l'intensità sonora. Quando il valore dell'esponente n è pari a 1, l'equazione assume una corrispondenza di tipo lineare tra sensazione ed intensità fisica, cioè aumenti costanti

della grandezza fisica percepita si accompagnano ad aumenti costanti della sensazione. Questo caso è, banalmente, quello delle lunghezze visive: il nostro sistema percettivo permette una valutazione con una precisione paragonabile nella stima di lunghezze sia molto piccole (nell'ordine dei millimetri) che molto grandi (nell'ordine dei chilometri). L'ultimo caso, quello del valore dell'esponente n superiore a 1, è quello esattamente previsto da una funzione di tipo esponenziale, in cui cioè aumenti costanti della stimolazione fisica determinano aumenti di tipo sempre maggiore della sensazione corrispondente. Questo tipo di relazione è stato individuato nello studio delle sensazioni di tipo doloroso: ad esempio, la sensazione di dolore che si accompagna alla somministrazione di scosse elettriche sulla cute dei soggetti cresce in modo esponenziale, cioè aumentando di una quantità costante la corrente elettrica erogata si ottiene un aumento di quantità sempre maggiori della sensazione dolorosa. Anche questo tipo di relazione, come nel caso della compressione del dominio sensoriale operata dalla funzione logaritmo, ha un valore biologico molto importante: segnali di tipo doloroso è meglio che vengano "amplificati" rapidamente, mettendo il soggetto nella condizione di allontanarsene altrettanto rapidamente. Un'altra innovazione concettuale dovuta a Stevens fu la distinzione tra **continua protetici** e **continua metatetici**. Questa distinzione riguarda il modo di variare della dimensione soggettiva al variare della dimensione fisica. Un continuum protetico è una dimensione fisica che variando in modo continuo determina una dimensione soggettiva che varia anch'essa in modo continuo. Ad esempio, l'intensità luminosa è un continuum protetico: aumenti della luminanza fisica si accompagnano ad aumenti di quella

percepita. Un continuum metatetico è una dimensione fisica che variando in modo continuo determina una dimensione soggettiva che varia in modo qualitativo o si concentra intorno a dei valori prototipici. Ad esempio, la lunghezza d'onda della luce è un continuum metatetico: aumenti della lunghezza d'onda non vengono percepiti come tali ma come cambiamenti del colore della luce, cioè come un certo numero di colori qualitativamente diversi lungo il continuum.

Un'altra importante novità della psicofisica del secolo scorso fu l'introduzione della cosiddetta **Teoria della Detezione del Segnale** (dall'inglese *Signal Detection Theory*), nata negli anni successivi alla Seconda Guerra Mondiale dai lavori di Green e Swets, due ricercatori americani interessati ad indagare la rilevazione (*detection*, da cui l'anglicismo "detezione") di segnali in condizioni di rumore (quest'ultimo termine si intende in senso lato e significa puramente che il canale comunicativo presenta dei disturbi casuali, qualunque sia la modalità sensoriale in questione) in un contesto analogo a quello della teoria statistica delle decisioni. L'idea di Green e Swets fu quella di valutare la capacità sensoriale dei soggetti (inizialmente vennero scelti ambiti applicativi industriali e militari) presentando loro un certo numero di prove in ciascuna delle quali doveva venir valutata la presenza o l'assenza di uno stimolo (come nella valutazione di soglie). Tuttavia, in questo tipo di metodologia, lo stimolo poteva essere effettivamente presente, ma poteva anche essere assente, generando una quaterna di possibili accoppiamenti tra presenza fisica e rilevazione da parte del soggetto: 1) se lo stimolo è fisicamente presente e la risposta del soggetto è di tipo affermativo (del tipo "lo vedo", o "c'è") si parla di **Hit** cioè di rilevazione con successo, 2) se lo

stimolo è presente e la risposta del soggetto è negativa (“non lo vedo”, “non c’è nulla”) si parla di **Omissione**, cioè si tratta di una rilevazione fallita, 3) se lo stimolo è fisicamente assente e il soggetto (correttamente) fornisce una risposta negativa si parla di **Rifiuto Corretto** e infine 4) se lo stimolo è assente ma il soggetto asserisce di rilevarne la presenza si parla di **Falso Allarme**. La teoria della detezione del segnale, attraverso l’analisi delle percentuali di *Hit*, Omissioni, Rifiuti Corretti e Falsi Allarmi totalizzate dai soggetti nell’esecuzione di un certo numero di prove, permette di individuare due indicatori numerici: un primo indicatore è la **sensibilità** del sistema (indice **d’**) che rende conto dell’accuratezza nella rilevazione del segnale, basandosi sul calcolo della differenza tra percentuale di *Hit* e percentuale di Falsi Allarmi (essa indica cioè quanto il sistema è sensibile); il secondo indicatore è il cosiddetto **criterio dell’operatore** (indice **β**), che si basa sul rapporto tra le percentuali di *Hit* e di Falsi Allarmi fornendo un’indicazione della tendenza non tanto della sensibilità del sistema, bensì della tendenza comportamentale a fornire risposte affermative anche in assenza di certezza, cioè misurando il criterio soggettivo di decisione lungo la dimensione che potremmo definire della cautela/azzardo. Questa tecnica, che nacque da esigenze ingegneristiche legate alla selezione degli operatori umani da destinare alla radiorilevazione in navigazione aerea e marittima (in particolare degli operatori radar), acquisì una notevole importanza in psicologia della percezione, rappresentando un ottimo compromesso tra lo studio delle soglie attraverso i metodi classici (fechneriani) e il riconoscimento della giusta importanza a quei fattori cognitivi e decisionali che possono influenzare giudizi anche semplici come quelli sulle sensazioni.

Esistono altri metodi psicofisici di tipo “adattivo”, cioè che si adattano alle risposte del soggetto, così come si è detto per il metodo dei limiti (in cui al raggiungimento di una sensazione di cambiamento consegue l’interruzione della presentazione della serie di stimoli). Un esempio è quello fornito dal “metodo della scala” o “metodo *staircase*”, molto usato in ambito acustico, che somiglia al metodo dei limiti nel senso che prevede la presentazione di una serie di stimoli di intensità crescente o decrescente. La differenza rispetto al metodo dei limiti, tuttavia, è che una volta raggiunta una sensazione di cambiamento (i.e. il soggetto riporta di cominciare a percepire qualcosa in una serie ascendente o riporta di smettere di percepire qualcosa in una serie discendente) la direzione della serie viene invertita e si procede a determinare la successiva sensazione di cambiamento, e via dicendo, determinando così un gran numero di punti di transizione, la cui media coincide con il valore di soglia cercato.

I sensi e la psicofisica

L'insieme dei sistemi sensoriali ci permette di rivelare e distinguere stimoli fisici e, nella quasi totalità dei casi, di stabilire relazioni qualitative. Tuttavia, non sempre è possibile stabilire un rapporto univoco fra stimoli e sensazioni, poiché queste ultime scaturiscono da una fusione multisensoriale e sono influenzate da molti fattori come regole sociali o abitudini, stati d'animo o situazioni fisiche ed ambientali.

Si è resa utile, così, l'istituzione di una nuova disciplina scientifica che permettesse di stabilire metodi per lo studio della sensazione e creasse nuovi standard per la sua misura e catalogazione. Tale disciplina è la *psicofisica*, fondata nel 1860 dal fisico e psicologo tedesco G.T. Fechner.

La sensazione e la sua misura

Dal punto di vista psicofisico, le grandezze fisiche associate ad uno stimolo possono essere suddivise in due grandi categorie: grandezze protetiche e grandezze metatetiche. Le *grandezze protetiche* sono quelle in cui, al variare progressivo di una proprietà fisica dello stimolo, viene associata una corrispondente variazione della sensazione lungo un unico asse sensoriale (per esempio: il peso, la temperatura, la lunghezza). In generale, queste grandezze danno luogo anche alla nozione di valore intermedio tra due estremi, purché lo stimolo, nonostante la variazione quantitativa, resti sostanzialmente simile in tutto il campo di variazione. Le *grandezze metatetiche* sono quelle per cui, al variare progressivo di una proprietà fisica (misurabile) dello stimolo, corrisponde una variazione qualitativa della sensazione (per esempio, se viene cambiata con continuità la lunghezza d'onda di una sorgente di luce monocromatica, il corrispondente cambiamento di tonalità non è soggettivamente riconducibile ad un unico continuo, infatti il colore verde, la cui lunghezza d'onda è intermedia tra quelle del rosso e del blu, non può essere considerato un colore intermedio fra questi due).

metatetiche

La nozione di sensazione è stata da sempre una nozione controversa che ha spaccato il mondo scientifico in due correnti di pensiero. Una corrente (più vicina alla fisica) sostiene che la sensazione è ciò di cui si fa esperienza e che si manifesta nel corso di una stimolazione, quindi essa corrisponde ad un ben preciso stato fisiologico del sistema nervoso che è suscettibile di una misura obiettiva al pari dello stimolo che genera la sensazione stessa. Tuttavia, non potendo procedere nell'uomo a misure di carattere neurofisiologico, devono essere accettate le interferenze legate alla mediazione della coscienza e alle capacità espressive dell'osservatore, cercando di capire come e quanto tali interferenze interagiscono nella misura ed operando con la fiducia che esse non modificano pesantemente l'oggetto della misura. L'altra corrente (più vicina alla psicologia), invece, sostiene che la sensazione è l'unità elementare non analizzabile della percezione e quindi non si può parlare a priori di una corrispondenza fra giudizi sensoriali espressi dall'osservatore e processi fisiologici, la cui realtà non può essere negata, ma la cui natura protetica è ancora un'ipotesi indimostrabile. Questa seconda posizione tende a stimolare un disinteresse verso la natura di tali stati fisiologici, difendendo invece la classica tesi operativistica secondo la quale hanno diritto a considerazione solo i comportamenti esterni.

IL CONCETTO DI MISURA E LE SCALE DI MISURA

In psicofisica, *misurare una proprietà* consiste nell'assegnare, secondo una regola ben definita, un numero ad ogni elemento di una classe di oggetti che possiede tali proprietà. Per rappresentare una proprietà, deve esistere un isomorfismo (cioè una corrispondenza strutturale biunivoca) tra lo spazio dei numeri e quello degli oggetti che possiedono tale proprietà; ciò ci permette di associare numeri ed oggetti univocamente ed in modo tale che una data relazione fra numeri rifletta le relazioni tra gli oggetti rispetto alla proprietà in esame. Le caratteristiche fondamentali dello spazio dei numeri sono: l'identità, l'ordine, la distanza e l'origine. L'*identità* implica che ogni numero sia uguale a se stesso e differente da tutti gli altri. L'*ordine* implica che i numeri siano ordinati. La *distanza* implica che anche le differenze tra i numeri siano ordinate. L'*origine* o *esistenza dello zero* implica che la serie di numeri contenga un elemento (lo zero) tale che la differenza fra ogni numero e questo elemento sia ancora uguale al numero.

Ciò premesso, possiamo distinguere cinque tipi di scala: scale nominali, scale ordinali, scale di intervalli, scale di rapporto, scale assolute; ognuna delle cinque scale corrisponde ad un isomorfismo che tiene conto di una o più caratteristiche dello spazio dei numeri. Le *scale nominali* sono basate sul concetto di identità, cioè ogni simbolo dello spazio dei numeri viene usato per rappresentare un oggetto della classe con tutte le sue proprietà (ad esempio, l'assegnazione di un numero ad ogni giocatore di una squadra di calcio). Le *scale ordinali* sono basate sul concetto di ordine, cioè, ammettendo che gli oggetti possano essere ordinati in serie monotona rispetto ad una proprietà, si associano numeri ed oggetti in modo che i loro ordini coincidano (ad esempio, le classifiche di preferenza dei film o quelle dei dischi più venduti). Le *scale di intervalli* sono basate sul concetto di distanza, cioè, ammettendo che gli oggetti e le differenze tra le loro qualità possano essere ordinate, si associano numeri e oggetti in modo che la differenza tra numeri rifletta le differenze tra le qualità (ad esempio le scale di temperatura Fahrenheit o Celsius); queste scale non hanno una origine (uno zero) definito. Le *scale di rapporto* sono basate sul concetto di origine, cioè, sono scale di intervalli nelle quali è possibile considerare un oggetto come riferimento, attribuendogli il valore zero (ad esempio le scale di peso in Kg). Le *scale assolute* sono basate su tutti e quattro i concetti, cioè sono un'identità con la serie di numeri naturali (ad esempio le enumerazioni di oggetti).

Ad ogni tipo di scala corrisponde una limitazione della regola di associazione fra numeri ed oggetti. I cinque tipi che abbiamo descritto possono essere caratterizzati secondo il criterio della forza più o meno grande della limitazione, o, equivalentemente, della rimanente arbitrarietà della regola. Più precisamente, ogni tipo di scala è caratterizzato dal tipo di trasformazione fra due scale dello stesso tipo che lascia invariante il senso della misura (classe di equivalenza). Quindi le *scale nominali* sono invarianti per ogni trasformazione uno ad uno, le *scale ordinali* sono invarianti per ogni trasformazione monotona, le *scale di intervalli* sono invarianti per ogni trasformazione lineare ($y=ax+b$), le *scale di rapporto* sono invarianti per ogni trasformazione proporzionale ($y=ax$) e le *scale assolute* sono invarianti solo per la trasformazione identità ($y=x$).

Nel caso in cui sia possibile effettuare una misura obiettiva di una certa proprietà ed esista una relazione tra misura fisica e misura psicologica di tale proprietà, si parla di *funzione psicofisica* della proprietà in esame. In seguito faremo sempre l'ipotesi implicita che una tale misura fisica esista e quindi che le scale ottenute siano funzioni psicofisiche.

PROCEDURE NUMERICHE PER IL CALCOLO DELLE SCALE

Il calcolo effettivo della scala a partire dalle risposte dell'osservatore differisce leggermente secondo che si siano o meno definite esplicitamente una serie di categorie di risposta. Se è stato definito un gruppo categorie i dati grezzi prelevati direttamente dagli esperimenti possono essere schematizzati come segue:

		Categorie					
		1	2	...	i	...	m
Stimoli	1	f_{11}	f_{12}	...	f_{1i}	...	f_{1m}
	2	f_{21}	f_{22}	...	f_{2i}	...	f_{2m}

	j	f_{j1}	f_{j2}	...	f_{ji}	...	f_{jm}

n	f_{n1}	f_{n2}	...	f_{ni}	...	f_{nm}	

dove f_{ji} sono il numero di volte che lo stimolo j viene attribuito alla categoria i . Assumendo che le categorie siano di tipo numerico e che ciascuna di esse sia indicata con un numero, i valori della sensazione soggettiva (\bar{S}) di ogni stimolo (S) possono essere stimati attraverso il calcolo della categoria media, espressa dalla seguente espressione:

$$\bar{S}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m C_i f_{ji} \quad j = 1, \dots, n$$

in cui C_i è il numero associato alla categoria i , f_{ji} è il numero di volte in cui lo stimolo è stato giudicato appartenente alla categoria i , m è il numero di categorie

TABELLA VI.1 Dati relativi ad un esperimento mirato alla costruzione di una scala di misura per la sensazione del peso (in presenza di categorie). Sono riportate i pesi e le categorie, per ciascuna di esse sono indicate le percentuali di associazione peso-categoria e di appartenenza a categorie inferiori o uguali a quella considerata.

	1		2		3		4		5	
50	40	40	47	87	13	100	-	100	-	100
55	16	16	51	67	30	97	3	100	-	100
60	4	4	35	39	48	87	13	100	-	100
65	1	1	19	20	51	71	27	98	2	100
70	-	0	9	9	44	53	40	93	7	100
75	-	0	9	3	30	33	51	84	16	100
80	-	0	1	1	18	19	53	72	28	100
85	-	0	-	0	10	10	43	53	47	100
90	-	0	-	0	4	4	35	39	61	100
95	-	0	-	0	1	1	36	37	63	100

ed n è il numero di presentazione di ciascun stimolo. Per distribuzioni asimmetriche è preferibile utilizzare il concetto di mediana, cioè si calcolano i valori dello stimolo S che hanno il 50% di essere giudicati appartenenti ad una categoria e ad essi si attribuisce un valore di sensazione pari al numero associato alla categoria stessa, quindi sulla base di tali valori si calcolano le restanti sensazioni.

Per capire meglio il concetto consideriamo l'esempio esposto nelle tabelle VI.1 e VI.2 e in figura VI.7, nel quale si valutano le differenze nella scelta di media o mediana per la costruzione della scala nella sensazione del peso (in presenza di categorie). Viene preso in esame un campione di 100 soggetti, i quali sono sottoposti alla misura di alcuni pesi compresi tra 50 e 95 g e suddivisi in 5 categorie, cioè, (1) pesi minori o uguali a 50 g, (2) pesi compresi tra 50 e 65 g, (3) pesi tra 65 e 80 g, (4) pesi tra 80 e 95 g, (5) pesi maggiori di 95 g. Ad ogni soggetto sono stati presentati contemporaneamente 10 elementi differenti solo nel peso, ed è stato chiesto di inserirli nelle 5 categorie. In tabella VI.1, sono riportati i pesi e le categorie; per ciascuna di queste sono inseriti il numero di soggetti che ha abbinato peso e categoria (colonna di sinistra) e la percentuale che ha giudicato il peso sotto il limite superiore di categoria (colonna di destra). Considerando i valori di categoria media, otteniamo la seconda colonna di tabella VI.2, mentre per il calcolo dei valori mediani occorre riferirci al grafico di figura VI.7 (le curve sono ricavate per interpolazione, utilizzando le colonne di destra di ogni categoria di tabella VI.1), nel quale sono riportati i valori di stimolo fisico corrispondenti, che sono giudicati al

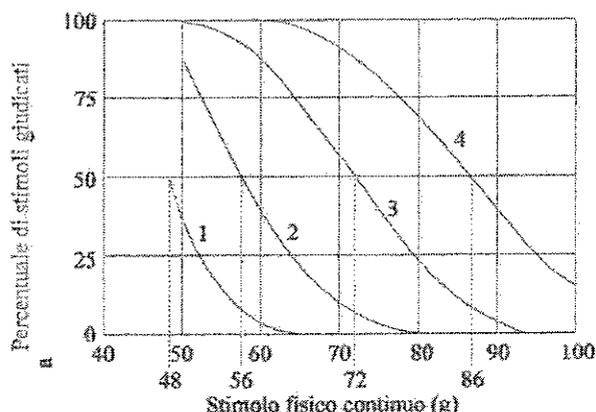


FIGURA VI.7 Rappresentazione grafica delle percentuali di tabella VI.1 riportate nella colonna destra di ogni categoria. Sono indicati i valori mediani per il calcolo della scala soggettiva utilizzando il concetto di mediana.

TABELLA VI.2 Valori di categoria media e di categoria mediana ricavati dalla tabella VI.1 e dalla figura VI.7. Il valore indicato per ciascuno stimolo S viene considerato anche valore della sensazione soggettiva, i valori tra parentesi sono estrapolati senza riscontro oggettivo.

Pesi	Categoria media o scala media	Categoria mediana o scala mediana
50	1.73	1.20
55	2.20	1.70
60	2.70	2.18
65	3.10	2.60
70	3.45	2.95
75	3.80	3.29
80	4.08	3.60
85	4.37	3.94
90	4.57	(4.23)
95	4.62	(4.50)

50% appartenenti ad una categoria; sulla base di questi otteniamo la terza colonna di tabella VI.2 (tra parentesi sono riportati i valori estrapolati in relazione alle distanze tra valori mediani). Nel caso valutato è possibile constatare dalla tabella VI.2 che la scala soggettiva calcolata attraverso il calcolo della media è più adeguato di quello della mediana per una maggiore corrispondenza con lo stimolo fisico.

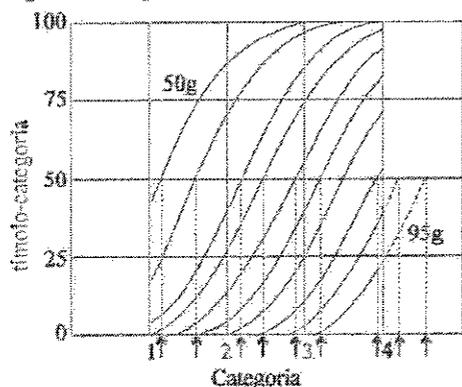


FIGURA VI.8 Rappresentazione grafica delle percentuali di associazione peso-categoria (ogni curva è tracciata con i dati della colonna destra di tabella VI.1, presi per righe). Le frecce indicano i valori mediani dei limiti di categoria.

Quando nessuna categoria è definita a priori, l'osservatore indica, ad ogni presentazione dello stimolo, un valore qualunque del continuo metrico considerato, quindi i dati grezzi risultano esprimibili come segue:

Stimoli	Prove					
	1	2	...	i	...	m
1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1i}	...	a_{1m}
2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2i}	...	a_{2m}
...						
j	a_{j1}	a_{j2}	...	a_{ji}	...	a_{jm}
...						
n	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{ni}	...	a_{nm}

dove a_{ji} indicano i valori attribuiti allo stimolo j nella prova i . Assumendo nuovamente che le categorie siano di tipo numerico e che ciascuna di esse sia indicata con un numero, i valori della sensazione soggettiva (\tilde{S}) di ogni stimolo (S) possono essere stimati ancora attraverso il calcolo della categoria media, espressa dalla seguente espressione:

$$\tilde{S}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{ji} \quad j = 1, \dots, n$$

Queste tecniche presuppongono che esista una rappresentazione stabile dei limiti fra le categorie e ipotizzano che tutta la variabilità sia concentrata nella rappresentazione degli stimoli. È possibile invertire il problema, cioè assumere che tutta la variabilità sia concentrata nella rappresentazione delle categorie, questo porta a calcolare i limiti di categoria a partire da associazioni a priori tra sensazione e stimoli. Riferendoci all'esempio precedente, i dati di tabella VI.1 possono essere sfruttati anche per calcolare i limiti medi o mediani

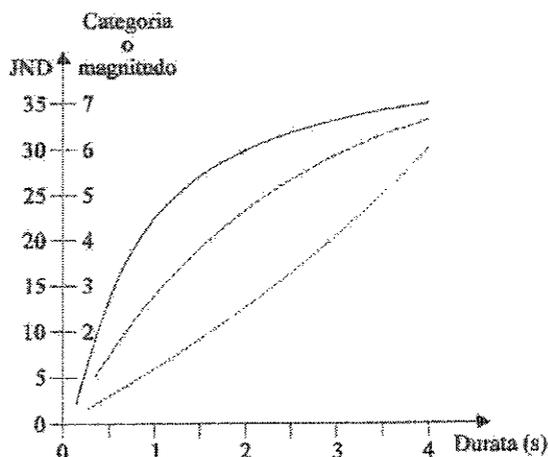


FIGURA VI.9 Rappresentazione grafica di tre scale soggettive per un impulso di rumore bianco con durata variabile. Le tre scale sono ottenute considerando: giudizi di grandezza (linea tratteggiata fine), giudizi di categoria (linea tratteggiata) e giudizi differenziali (linea continua).

(figura VI.8) dei limiti di categoria.

Malgrado quanto è stato detto riguardo alla relativa sensibilità delle scale soggettive rispetto al numero di categorie definite a priori, si osservano differenze sistematiche, quando si confrontano i risultati ottenuti con l'uso delle categorie (anche in numero molto alto) e quelli ottenuti senza l'uso delle categorie (metodi grafici o analogici), come risulta visibile dalla figura VI.9.

Metodi di stima della sensazione

Parallelamente al dibattito epistemologico sulla nozione di sensazione, anche il problema metodologico della misura soggettiva delle grandezze protetiche è stato oggetto di controversie fino dagli albori della psicofisica. In genere, i metodi sperimentali si suddividono in due categorie: i *metodi di stima diretta* e i *metodi probabilistici o di scelta*; le due famiglie, tuttavia, non si distinguono sulla base delle loro premesse epistemologiche, ma solo sulla natura delle relazioni che un osservatore stabilisce con il continuo di riferimento.

I METODI DI STIMA DIRETTA

I metodi di stima diretta sono rivolti alla misura della sensazione nel tentativo di stabilire una sua scala di misura. Gli esperimenti di stima diretta sono compiuti fornendo all'osservatore un continuo fisico obiettivamente dotato di struttura metrica, chiedendo di stabilire, per ogni valore dello stimolo, una corrispondenza fra la sensazione che questo stimolo procura e un valore del continuo fisico. Questi metodi, a prescindere dal fatto che esista o meno una relazione biunivoca tra un preciso stato fisiologico e il manifestarsi esterno della sensazione soggettiva, si basano sul concetto che un osservatore sappia stabilire una corrispondenza stabile fra le proprie categorie di risposta ed un continuo fisico di riferimento. Non dobbiamo dimenticarci, però, della possibilità che non sia possibile stabilire un isomorfismo tra categorie di giudizio e processi sensoriali nervosi, altrimenti c'è il rischio di giungere a conclusioni logicamente errate; da ciò nasce l'esigenza di affermare che se i metodi diretti non richiedono l'ipotesi di un corrispondente fisiologico della sensazione, non possono neppure essere utilizzati per provare l'esistenza di un tale corrispondente.

Questi metodi si suddividono in tre grandi classi in relazione al tipo di informazione (richiesta all'osservatore) sul continuo in esame: *metodi di stima soggettiva*, *metodi di frazionamento* e *metodi di equisezione*; tutti richiedono la caratteristica di ordinamento.

I *metodi di stima soggettiva* sono basati sul fatto che l'osservatore possa scegliere e ordinare i membri di una serie di stimoli, in modo che i rapporti delle differenze fra i numeri assegnati agli stimoli siano uguali ai rapporti delle distanze che separano gli stimoli nell'ipotetico continuo psicologico. Il compito per il soggetto è quello di indicare il valore soggettivo di scala di una serie di stimoli con la conseguenza che, in ragione del tipo di scala ottenuto (scala di intervalli), l'origine

e il fattore di scala (unità di misura) sono necessariamente e arbitrariamente fissati in funzione dei giudizi. Questa arbitrarietà può essere ridotta progressivamente mediante opportuni accorgimenti: si utilizza una scala di rapporti, indicando uno zero in corrispondenza di un ben definibile evento sensoriale (per esempio il valore di soglia); oppure si fissa una misura, indicando il valore di scala che convenzionalmente si associa a un altro evento ben definito (per esempio, il valore 100 alla temperatura di ebollizione dell'acqua).

I *metodi di frazionamento* sono basati sul fatto che l'osservatore sia capace di indicare direttamente il rapporto fra le quantità di proprietà pertinenti possedute da due stimoli, oppure di aggiustare o scegliere uno stimolo che sia un rapporto prefissato con uno stimolo di riferimento. Questi metodi vengono applicati con due tecniche diverse in base alla capacità dell'osservatore a cui ci si riferisce. Si parla di *tecnica di stima diretta* (porta alla definizione di una scala di rapporti) se vengono dati n stimoli, uno di essi (il minimo, il massimo o talvolta il medio) è designato come riferimento e l'osservatore deve indicare, per ognuno degli altri $n-1$ stimoli, qual è il rapporto fra questo stimolo e il riferimento. Una variante più sofisticata di tale tecnica è legata alla ripetizione dell'esperimento utilizzando in successione $n-1$ stimoli come riferimento e prendendo ogni coppia una sola volta; si ottengono quindi $n(n-1)/2$ giudizi indipendenti che vengono dati con il metodo detto della *somma costante*, cioè dati due stimoli S_1 e S_2 l'osservatore divide un totale di 100 punti in due parti in modo tale che $n_{S_1} + n_{S_2} = 100$ e che il rapporto n_{S_1}/n_{S_2} sia il più vicino possibile al rapporto che soggettivamente egli percepisce fra i due stimoli. Si parla invece di *tecnica del rapporto fisso* quando, dato uno stimolo, l'osservatore deve indicare o scegliere un altro stimolo che sia in rapporto K con il primo; tale rapporto è arbitrario, ma mantenuto fisso per tutta l'esperimento. I risultati grezzi dell'esperimento sono quindi un insieme di coppie di valori (obiettivi) dello

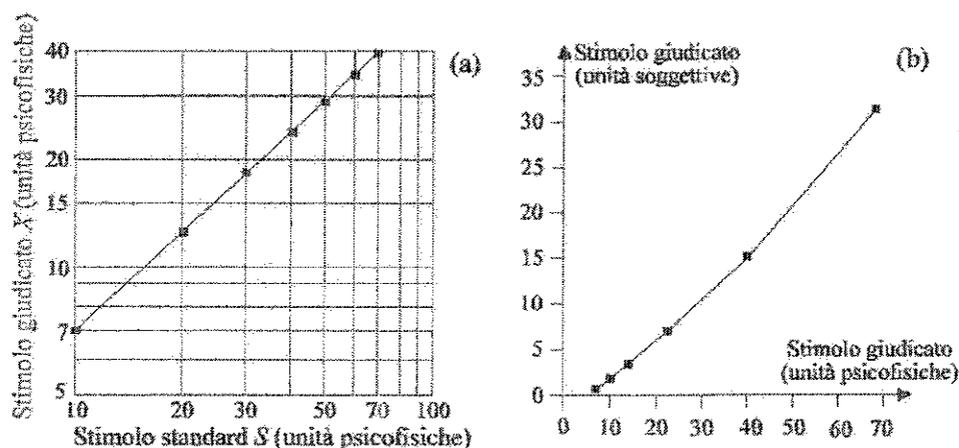


FIGURA VI.6 Esempio di applicazione della tecnica del rapporto fisso. (a) Dati raccolti direttamente dall'esperimento. (b) Scala soggettiva calcolata seguendo i seguenti passi: (1) Si fissa arbitrariamente una unità di misura, si associa 1 alla sensazione di valore 7 e si ottiene così il primo punto $A=(7;1)$; (2) lo stimolo il cui valore obiettivo è 10 viene percepito soggettivamente come doppio di quello il cui valore obiettivo è 7, quindi $B=(10;2)$; (3) dall'interpolazione grafica dei risultati grezzi risulta che un ipotetico stimolo che avesse valore 14.9 verrebbe percepito come di intensità doppia dello stimolo di valore 10, quindi $C=(14.9;4)$; (4) I punti successivi vengono ottenuti iterando lo stesso procedimento.

stimolo (x, y_K) in cui x è lo stimolo presentato e y_K è lo stimolo soggettivamente percepito essere in rapporto K con x (figura VI.10).

I *metodi di equisezione* sono basati sul fatto che l'osservatore sia capace di ordinare le differenze di sensazione. L'idea fondamentale, comune alle molte varianti dei metodi di equisezione, è quella di chiedere all'osservatore di indicare o scegliere uno o più stimoli, la cui distanza soggettiva è uguale a quella fra due stimoli di riferimento. Questi metodi danno origini a scale di intervalli e sono ricavati con un'ipotesi più debole rispetto ai precedenti metodi.

I metodi probabilistici

I metodi probabilistici o di scelta sono storicamente più antichi e scaturiscono dall'aprioristica sfiducia nella capacità dell'osservatore di stabilire una corrispondenza tra sensazioni e continuo fisico, quindi non utilizzano lo schema:

Stimolo → *Stima quantitativa*

basato su una stima assoluta ed una corrispondenza diretta tra lo stimolo e la stima stessa, ma adottano uno schema alternativo basato su una stima differenziale o di scelta, si chiede, cioè, se una sensazione sia più forte di un'altra:

Stimoli → *Stima di ordine*

più in dettaglio possiamo costruire la seguente catena di elementi:

Stimoli fisici		Sensazioni interne		Stima d'ordine		Risposta
S_1	→	\tilde{S}_1	→	$\tilde{S}_1 > \tilde{S}_2$	→	« \tilde{S}_1 »
S_2	→	\tilde{S}_2	→	$\tilde{S}_1 < \tilde{S}_2$	→	« \tilde{S}_2 »

I metodi di scelta sono logicamente svincolati da qualunque ipotesi sulla realtà di un preciso stato fisiologico corrispondente alla sensazione e per questo portano alla costruzione di scale di misura per la sensazione valide in assoluto.

La soglia sensoriale assoluta e la sua misura

Secondo la classica definizione di Fechner, la soglia sensoriale assoluta è quel valore dello stimolo al di sotto del quale la presentazione dello stimolo non produce alcun effetto sul sistema nervoso accessibile alla coscienza. In termini di scale sensoriali, la soglia è quel valore fisico dello stimolo a cui corrisponde una intensità soggettiva nulla (figura VI.11). In generale, per tutte le modalità normalmente esaminate, si assume che la soglia sensoriale sia un valore finito e identificabile dello stimolo.

La maggior parte delle ricerche condotte sulle soglie sensoriali assolute hanno studiato le variazioni della soglia in funzione di uno o più parametri dello stimolo,

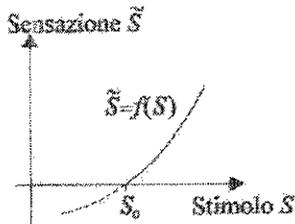


FIGURA VI.11 Rappresentazione di una generica funzione f che associa stimoli e sensazioni. In assenza di variabilità, la soglia è il valore dello stimolo che corrisponde ad una sensazione nulla.

distinti da quello di cui si misura il minimo valore percettibile (per esempio la misura della minima intensità udibile di un suono in funzione della sua frequenza).

Formalmente, la soglia è un punto della scala psicofisica che (teoricamente) potrebbe essere determinato con i metodi precedentemente descritti. Tuttavia, per definizione conosciamo che l'ordinata della soglia è zero, quindi ricaviamo il valore dello stimolo fisico che corrisponde ad una sensazione nulla.

La più semplice strategia per tale determinazione potrebbe essere quella di diminuire progressivamente il valore fisico dello stimolo, chiedendo ogni volta se una sensazione (non importa di che intensità) è ancora percettibile. Ci si accorge però immediatamente che tale strategia non è efficace poiché, per valori molto deboli dello stimolo, il comportamento dell'osservatore diventa altamente variabile.

Una strategia più efficace è basata sui metodi "Si-No", i quali impongono al soggetto (sottoposto all'esperimento) due soli giudizi categorici, senza possibilità di esprimere l'incertezza («Non so»). Assumiamo, quindi, che alla domanda: «Hai percepito lo stimolo?», l'osservatore risponda: «Sì, ho percepito uno stimolo» oppure «No, non ho percepito lo stimolo»; si può constatare che per valori molto alti o molto deboli dello stimolo le risposte sono sempre «Sì» nel primo caso e «No» nel secondo, mentre esiste un intervallo di valori dello stimolo in cui le risposte diventano probabilistiche, cioè al presentarsi multiplo di uno stesso stimolo compreso in questo intervallo la risposta è talvolta «Sì» e talvolta «No». Ciò sembra far corrispondere ad uno stesso valore di stimolo S una sensazione \tilde{S} variabile nel tempo; in realtà il soggetto esprime un giudizio in relazione al fatto che abbia o meno una sensazione, dunque possiamo assumere che la sensazione complessiva sia composta da uno stesso valore soggettivo dello stimolo \hat{S} e da un termine variabile nel tempo \hat{S}_0 che esprime il valore della soglia soggettiva istantanea assoluta. Sulla base di questo possiamo considerare che la sensazione complessiva sia espressa dalla variabile aleatoria \bar{S} e che la soglia sia espressa dalla variabile aleatoria \bar{S}_0 , ne segue quindi la seguente relazione:

$$\bar{S} = \hat{S} - \bar{S}_0$$

Siamo così in grado di associare agli eventi «Sì» e «No», le seguenti proposizioni:

$$\text{Risposta} = \begin{cases} \text{«Sì»} & \text{se } \hat{S} > \bar{S}_0 \\ \text{«No»} & \text{se } \hat{S} < \bar{S}_0 \end{cases} \quad (\text{VI.1})$$

non è necessario considerare il caso $\hat{S} = \bar{S}_0$ in quanto \bar{S}_0 è una variabile continua e quindi assume valori puntuali con probabilità nulla. La probabilità di una risposta «Sì» è quindi data dalla seguente espressione:

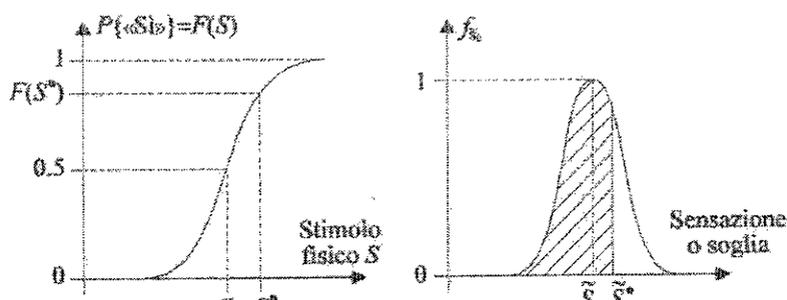


Figura VI.12 Grafici delle funzioni probabilistiche ricavati in un esperimento di detezione della soglia, (a) Funzione di distribuzione di probabilità delle risposte «S» in relazione allo stimolo fisico. (b) Assumendo che la funzione psicofisica sia $\Psi(S)=S$ la densità di probabilità è una gaussiana, quindi la soglia può essere assunta come una variabile casuale normale e il grafico (a) può essere ricavato integrando (area tratteggiata).

$$P\{\text{«Si»}\} = P\{\bar{S}_0 \leq \hat{S}\} = \int_{-\infty}^{\hat{S}} f_{\bar{S}_0}(x) dx \quad (\text{VI.2})$$

Secondo la definizione di scala, la funzione che trasforma i valori fisici in sensazioni soggettive è appunto la funzione psicofisica della grandezza protettica in esame:

$$\bar{S} = \Psi(S) \quad (\text{VI.3})$$

quindi dalla (VI.2) e dalla (VI.3) si ricava una relazione generale:

$$P\{\text{«Si»}\} = F(\Psi^{-1}(\hat{S})) = \int_{-\infty}^{\hat{S}} f_{\bar{S}_0}(x) dx$$

derivando ambo i membri si ricava:

$$f_{\bar{S}_0}(\hat{S}) = \frac{d}{dS} F(\Psi^{-1}(\hat{S})) = \left. \frac{dF/dS}{d\Psi/d\bar{S}} \right|_{\bar{S}=\hat{S}}$$

in generale si può assumere che la funzione psicofisica Ψ sia una funzione lineare e la sua derivata una costante, questo semplifica notevolmente il calcolo della funzione $f_{\bar{S}_0}$ che risulterebbe proporzionale alla derivata della funzione di distribuzione come nel caso presentato in figura VI.12.

Da queste considerazioni risulta che la soglia sensoriale assoluta S_0 è il valore fisico dello stimolo a cui corrisponde una probabilità di percezione pari ad 1/2. Nel caso di figura VI.12, in cui la funzione densità di probabilità è gaussiana e la funzione psicofisica è $\Psi(S)=S$, la soglia coincide con il valor medio di \bar{S}_0 .

Metodi di misura della soglia

Sulla base della concezione di soglia sensoriale enunciata sopra, i metodi per effettuare misure del suo valore sono diversi, i più importanti sono: il *metodo dello stimolo costante*, il *metodo dei limiti*, il *metodo della scala psicofisica* e il *metodo di aggiustamento*.

Il *metodo dello stimolo costante* presuppone che si conosca approssimativamente la zona in cui si trova la soglia. Si scelgono allora n valori S_1, \dots, S_n dello stimolo (in genere $5 \leq n \leq 9$), che coprono uniformemente tale zona e tali che $P\{\text{«Si»} | s_1\} = 0$ e $P\{\text{«Si»} | s_n\} = 1$. Si decide poi un certo numero m di ripetizioni per ciascuno degli n stimoli in modo da assicurare una stabilità sufficiente delle proporzioni di risposta. Si procede quindi ad m presentazioni esaustive degli n stimoli in modo che ogni valore sia presentato una e una sola volta in un ordine aleatorio diverso. È consigliabile scegliere ogni volta una delle $n!$ presentazioni possibili in maniera da soddisfare certi vincoli sugli intervalli di valore fra stimoli successivi, infatti si constata empiricamente che la stabilità delle risposte è migliore se gli intervalli fra stimoli successivi sono approssimativamente equiripartiti. Il risultato della procedura è la serie di n proporzioni (stime di probabilità):

$$P\{\text{«Si»} | s_k\} = \frac{\text{numero di risposte «Si»}}{m}$$

con cui si descrive per punti la funzione cumulata.

Il *metodo dei limiti* è una tecnica semplice che permette una rapida determinazione del valore approssimato della soglia. Si sceglie una serie di valori equidistanti (proporzione aritmetica o geometrica) dello stimolo, i cui termini includono sicuramente il valore stimato della soglia. A partire dal valore più piccolo, si presentano successivamente tutti i valori della serie, nel senso crescente, fino al valore S_k^+ che produce la prima risposta «Si» (serie crescente). Si ricomincia allora un'altra presentazione (in serie decrescente) a partire dal più grande valore dello stimolo e ci si ferma al valore S_k^- che produce la prima risposta «No». Si passa in seguito ad un'altra serie crescente ripetendo l'intera procedura un numero m di volte. Per ogni coppia di serie si calcola il valore istantaneo della soglia definito come media fra i due valori che producono un cambiamento di risposta:

$$\begin{cases} S_{0i}^+ = (S_{k-1}^+ + S_k^+)/2 \\ S_{0i}^- = (S_{k-1}^- + S_k^-)/2 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

si calcola poi la soglia media ascendente e discendente:

$$S_0^+ = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{0i}^+ \quad S_0^- = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{0i}^-$$

la stima della soglia è data infine dalla media aritmetica:

$$S_0 = \frac{S_0^+ + S_0^-}{2}$$

Il metodo dei limiti è frequentemente soggetto a due tipi di errori sistematici, in particolare in soggetti non allenati: l'*errore di abitudine* o di *perseveranza* e l'*errore d'anticipazione*. Il primo è la tendenza a ripetere la stessa risposta anche sopra o sotto soglia, quindi c'è una sopravvalutazione della soglia nelle serie ascendenti e una sottovalutazione nelle serie discendenti, si ha cioè $S_0^+ > S_0^-$; tuttavia il calcolo della soglia media può eliminarlo nel caso di simmetria della perseveranza. Il secondo errore è la tendenza ad anticipare la risposta pur non superando la

soglia, in questo caso si avrà $S_0^+ < S_0^-$; per minimizzare questo tipo di errore si può far variare, da una serie all'altra, il valore di partenza della serie, in modo che il numero di stimoli già presentati non possa essere usato per anticipare l'arrivo della soglia.

Il *metodo della scala psicofisica* è caratterizzato anche dal tipo di scala, quindi si parla di *scala semplice*, *scala doppia ad alternanza regolare* e *scala doppia ad alternanza aleatoria*. Per la *scala semplice* si predispone una serie ordinata di stimoli e si comincia a presentarla come nel metodo dei limiti. Alla prima inversione di risposta, però, la regola di presentazione diventa dipendente dalle risposte del soggetto: il senso di variazione della serie si inverte ogni volta che cambia la risposta, producendo così, una oscillazione (in generale irregolare) dei valori dello stimolo. La procedura può essere usata cominciando sia dallo stimolo più piccolo, sia da quello più grande; generalmente non si osservano differenze sistematiche fra i valori attorno ai quali oscillano le serie. Il metodo richiede la determinazione a priori di un criterio per determinare la presentazione (per esempio, si può decidere di effettuare dieci presentazioni dopo la prima inversione di risposta o di attendere il verificarsi di dieci inversioni). La *scala doppia ad alternanza regolare* è basata sulla stessa idea della precedente, ma si alternano regolarmente la presentazione dei

valori ordinati in serie ascendente con quella dei valori ordinati in serie discendente. Si instaura quindi una dipendenza del secondo ordine sia fra le presentazioni di ordine pari (per esempio nella serie discendente) che fra le presentazioni di ordine dispari (nelle serie ascendenti). La figura VI.13 illustra un esempio concreto di applicazione di tale metodo; dalla figura si nota una certa divergenza fra le soglie ascendenti e discendenti, segno evidente della tendenza all'anticipazione, mentre se le due curve si

incrociavano considerevolmente si avevano errori di perseveranza. La *scala doppia ad alternanza aleatoria* è una variante del metodo precedente in cui l'alternanza fra le due serie è resa aleatoria per minimizzare gli errori di anticipazione. Tutti i metodi che utilizzano serie di stimoli presentate successivamente possono essere generalizzati con l'uso di microprocessori adeguati. In particolare, il salto discreto da un valore dello stimolo al successivo può essere rimpiazzato da una deriva continua a velocità uniforme, la cui direzione cambia ogni volta che il soggetto alterna le risposte.

Il *metodo di aggiustamento* è il metodo più diretto e di più rapido e semplice uso. È però anche il metodo meno accurato. Partendo da valori decisamente sovra-limitari o decisamente sottolimitari, è l'osservatore stesso che manipola l'intensità dello stimolo fino a raggiungere un valore che egli giudica appena percepibile. Una certa stabilità della misura può essere ottenuta ripetendo più volte la procedura e alternando i valori di partenza.

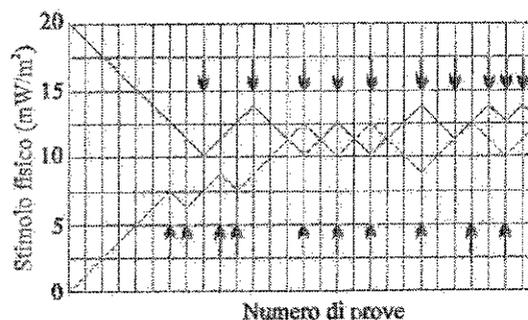


FIGURA VI.9 Grafico che illustra il metodo della doppia scala psicofisica. Viene riportata l'evoluzione di uno stimolo luminoso, le frecce indicano le inversioni di risposta.

CONSIDERAZIONI GENERALI SUI METODI DESCRITTI

Tutti i metodi considerati nel paragrafo precedente hanno in comune un importante fattore caratterizzante: presentato uno stimolo non nullo per un tempo determinato, l'osservatore può solo indicare con «Sì» o «No», se l'intensità dello stimolo è sufficiente per dar luogo a una sensazione cosciente o il contrario. Per questa ragione tali metodi vengono detti *metodi "Si-No"*. La loro intrinseca debolezza risiede nel fatto che l'osservatore è libero di scegliere lui stesso un criterio soggettivo per ciò che si deve intendere per "ragionevole sicurezza di aver percepito qualcosa". È intuitivo, e anche facilmente dimostrabile, che le modalità sperimentali possono modificare profondamente questo criterio soggettivo e quindi la soglia misurata. Inoltre, se dovessero intervenire variazioni spontanee dovute a pratica, stanchezza o altri fattori, esse non potrebbero essere indipendentemente misurate. Un criterio soggettivo adottato dall'osservatore può essere semplicemente descritto dalla (VI.1), in cui si è supposto che un osservatore ideale risponda sempre «Sì» se e solo se $\tilde{S}^* > \bar{S}_0$. Tuttavia un osservatore prudente tenderà ad aggiungere alla soglia un fattore di sicurezza ϵ^+ , rispondendo «Sì» se e solo se $\tilde{S}^* > \bar{S}_0 + \epsilon^+$. In tal modo, egli mancherà un certo numero di risposte positive, anche quando lo stimolo aveva sorpassato la soglia, ma di una quantità giudicata troppo piccola per dare affidamento. Questo osservatore prudente darà luogo ad un valore della soglia più elevato di quello giudicato dall'osservatore ideale. In maniera analoga, un osservatore, che per una ragione qualunque volesse ad ogni costo evitare il rischio di rispondere «No» in casi in cui lo stimolo ha sorpassato la soglia farà ricorso ad un fattore di sicurezza ϵ^- , rispondendo «Sì» non appena $\tilde{S}^* > \bar{S}_0 - \epsilon^-$. In tal modo, egli incorre nell'errore opposto, cioè risponde «Sì» anche se lo stimolo non ha effettivamente sorpassato la soglia. Come conseguenza la soglia misurata in questo caso è più bassa di quella misurata dall'osservatore ideale.

Si noti bene che questa descrizione della soggettività del criterio di risposta è interamente dipendente dall'ipotesi (non dimostrata) che esista davvero un valore dello stimolo (la soglia) al di sotto del quale non si ha nessuna sensazione misurabile. Il fatto che le stimolazioni sperimentali possano modificare il valore misurato della soglia, può però, ugualmente dar luogo ad una critica molto più radicale dei metodi di stima che contesta appunto il concetto stesso di soglia. Due soluzioni sono state comunque proposte per ovviare ai più evidenti inconvenienti dei metodi di stima: le *presentazioni fittizie* e il *paradigma della scelta forzata*.

Il *metodo delle presentazioni fittizie*, nel contesto del paradigma Si-No, consiste nell'inserire a caso, fra le varie presentazioni, un numero di presentazioni fittizie, cioè di casi in cui, nell'intervallo di tempo in cui lo stimolo deve essere presentato, in effetti non succede niente. In linea di principio, il comportamento dell'osservatore in questi casi deve fornire un'indicazione sulla sua attitudine (criterio soggettivo di risposta).

Il *metodo della scelta forzata (Forced-Choice)* consiste nel presentare lo stimolo in uno ed uno solo degli m intervalli di tempo e nel richiedere all'osservatore di indicare in quale intervallo lo stimolo fosse. Quando lo stimolo è largamente sopraliminare, la probabilità di indicare l'intervallo corretto è vicina ad 1. Nel caso

di stimoli molto deboli, l'osservatore, obbligato a dare una risposta (non si ammette il «Non so»), indicherà in maniera quasi casuale uno degli intervalli. Una deviazione significativa della probabilità di identificazione del valore $1/m$ (contributo del caso) può dunque essere considerata una misura di sensibilità relativamente indipendente dai fattori soggettivi (criterio) che possono viziare la procedura "Sì-No". Qualora si possono definire m stati complementari nello stimolo, indipendenti dalla dimensione protetica in esame, il metodo della scelta forzata è applicabile a questi m stati (ad esempio nella misura della soglia di velocità per la determinazione del movimento di uno stimolo visivo, le quattro fondamentali direzioni dello spazio possono essere utilizzate chiedendo all'osservatore: «In quale di queste direzioni è il movimento?»).

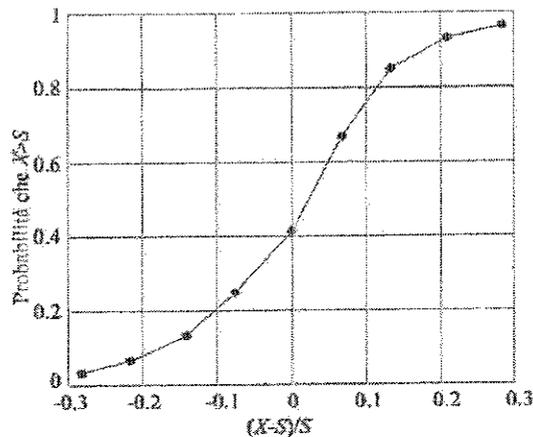


FIGURA VI.14 Esempio di funzione psicometrica per l'intensità sonora (stimolo standard di 50 dB SPL sopra il riferimento assoluto di $0.2 \cdot 10^{-5}$ dina/cm²).

La funzione psicometrica e le scale differenziali

In un intorno limitato di valori dello stimolo, il comportamento del soggetto è di natura probabilistica, infatti aumentando progressivamente l'intensità dello stimolo da un valore appena sottoliminare ad uno appena sovraliminare, la proporzione (o probabilità) di detenzione (risposte «Sì») aumenta monotonamente da 0 a 1, dando luogo alla curva di risposta per la soglia assoluta. La posizione della curva sul continuo dei valori fisici dello stimolo e la sua pendenza media descrivono la sensibilità assoluta del canale sensoriale considerato. Supponendo di presentare

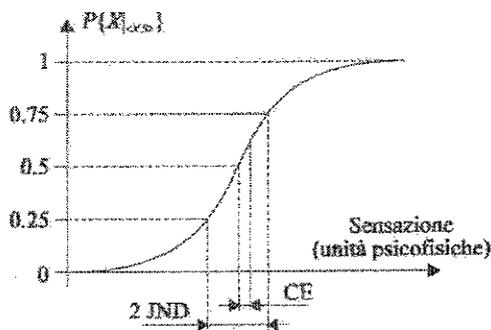


FIGURA VI.15 Interpretazione grafica della funzione $\Delta(X, \pi)$ e dei parametri fondamentali: l'errore costante CE (Constant Error) e la soglia differenziale JND (Just Notice Difference).

due stimoli S ed X di valore oggettivamente diverso, alla domanda «la loro differenza è percepibile?» si constata la presenza di due tipi di comportamento: nel caso in cui X sia molto più grande di S o nel caso contrario, il soggetto tiene un comportamento di tipo deterministico (ad esempio dice sempre di percepire una differenza oppure riesce sempre ad indicare con certezza lo stimolo più grande), diminuendo invece progressivamente la differenza assoluta $X-S$, si trova un valore al di sotto del quale il comportamento torna di tipo

probabilistico (per una data coppia di stimoli l'osservatore talvolta percepirà una differenza o saprà indicare correttamente lo stimolo più grande e talvolta ne sarà incapace). Supponendo, invece, di mantenere costante il valore di S (stimolo di riferimento o standard) e di far variare con continuità X da valori molto inferiori a valori molto superiori allo standard, alla domanda « X è più grande di S ?» si ottengono (a patto di presentare ogni coppia (S, X) un numero di volte sufficiente per stimare le probabilità di risposta in modo stabile) i grafici di figura VI.14.

Se consideriamo la probabilità di rispondere che X è maggiore di S , si ricava una stima di X rispetto allo standard S ; tale stima, fissato lo standard S , è una funzione di X che viene chiamata *funzione psicometrica rispetto allo standard S* :

$$F_s(X) = P\{X > S|_{(S, X)}\} \quad (\text{VI.4})$$

Definiamo implicitamente la funzione $\Delta(S, \pi)$, essa è la quantità di stimolo rispetto allo standard S tale che la probabilità che X sia maggiore di S sia pari a π :

$$P\{X > S|_{(S, S + \Delta(S, \pi))}\} = \pi \quad \text{con } 0 \leq \pi \leq 1 \quad (\text{VI.5})$$

utilizzando la (VI.4) e ricavando dalla (VI.5) la funzione $\Delta(S, \pi)$ si ottiene:

$$\Delta(S, \pi) = F^{-1}(\pi) - S$$

per definizione si assume che $F^{-1}(\pi) = X\pi$, quindi risulta che:

$$\Delta(S, \pi) = X\pi - S$$

La funzione $\Delta(S, \pi)$, graficata in figura VI.15, ci permette di definire in modo semplice e formale due importanti parametri: la *soglia differenziale* e l'*errore costante*. La *soglia differenziale* o *differenza appena percettibile* viene indicata con *JND* (dall'acronimo inglese Just Noticeable Difference) ed è definita come la differenza tra il valore dello stimolo X che ha la probabilità π di essere riconosciuto superiore allo standard S e il valore di stimolo a cui è associata la probabilità complementare (figura VI.15):

$$JND = \frac{\Delta(S, \pi) - \Delta(S, 1 - \pi)}{2}$$

L'*errore costante* è indicato con *CE* (sempre dall'acronimo inglese Costant Error) ed è definito come il valore di stimolo X che ha probabilità 1/2 di essere riconosciuto superiore allo standard S (in pratica è la mediana tra gli stimoli):

$$CE = \Delta(S, 1/2)$$

La sua interpretazione grafica è riportata in figura VI.15.

Legge di Weber

La funzione psicometrica descrive un comportamento locale e, in particolare, il potere di descrizione in quel ristretto intervallo di valori dello stimolo, intorno al valore di riferimento, nel quale il comportamento dell'osservatore è di natura probabilistica.

Per capire come la funzione psicometrica dipenda dal valore dello stimolo di riferimento ci si riconduce a studiare le variazioni di soglia differenziale ed errore costante in funzione dello standard S . L'errore costante ha ricevuto poca attenzione da parte degli sperimentalisti, in quanto essi hanno soprattutto cercato di realizzare procedure sperimentali atte a minimizzare tale errore. Lo studio della soglia differenziale è stato molto curato ed ha dato buoni risultati; in generale, si è osservato che

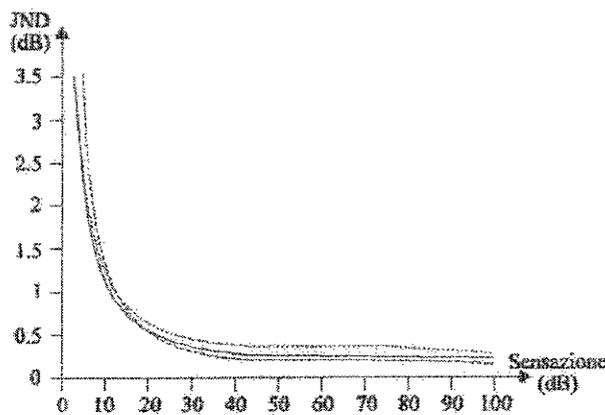


FIGURA VI.17 Andamento grafico della JND in funzione della sensazione per i soggetti SM (linea tratteggiata fine) e GM (linea tratteggiata), confrontato con l'andamento ottenuto dalla legge di Weber (linea continua).

Nel corso degli anni lo stesso Weber propose un problema più generale, la cui soluzione va sotto il nome di *legge di Weber* ed è espressa dalla seguente relazione:

$$\Delta(S, \pi) = k(\pi)S + C(\pi) \quad (\text{VI.6})$$

dove $k(\pi)$ e $C(\pi)$ sono costanti dipendenti solo dalla probabilità π . La (VI.6) afferma l'esistenza di una proporzionalità diretta fra soglia differenziale e valore dello stimolo. In un certo numero di casi, tale legge si dimostra empiricamente

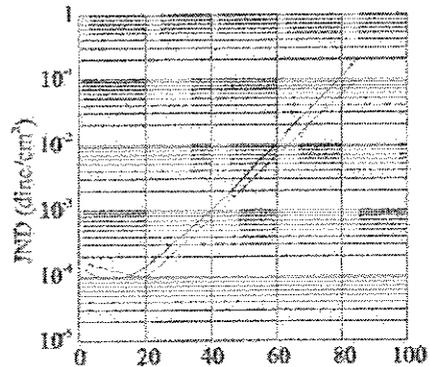


FIGURA VI.16 Rappresentazione grafica della variazione del JND rispetto allo stimolo standard. Le curve tracciate sono riportate per due soggetti: SM (linea continua) e GM (linea tratteggiata).

la *JND* aumenta con l'intensità dello stimolo usato come standard e il suo andamento tipico è rappresentato in figura VI.16.

Nel campo della soglia differenziale un problema che ha "attanagliato" per molto tempo la psicofisica è stato quello di trovare una relazione semplice che legava lo standard S alla soglia *JND* stessa. Si cercava cioè di esplicitare $\Delta(S, \pi)$ in funzione di S :

$$f(S) = \Delta(S, \pi)$$

dove $f(S)$ è detta *funzione di Weber*.

soddisfacente come visibile in figura VI.13. In altri casi, relazioni funzionali diverse (ad esempio la legge di potenza $\Delta(S, \pi) = k(\pi)S^\alpha$ con $\alpha > 0$) si dimostrano più appropriatamente (figura VI.18), tuttavia la forma specifica della relazione $f(S) = \Delta(S, \pi)$ non sembra comunque avere molta importanza teorica. Se viene assunto che la dipendenza lineare della (VI.6) sia soddisfacente, la sensibilità differenziale di un dato canale sensoriale può essere caratterizzata dalla costante $k(\pi)$, chiamata *costante* o *frazione di Weber* ed espressa dalla seguente relazione (ricavata direttamente dalla (VI.6)):

$$k(\pi) = \frac{\Delta(S, \pi) - C(\pi)}{S}$$

I valori tipici della costante di Weber per alcuni canali sensoriali sono indicati nella tabella VI.3.

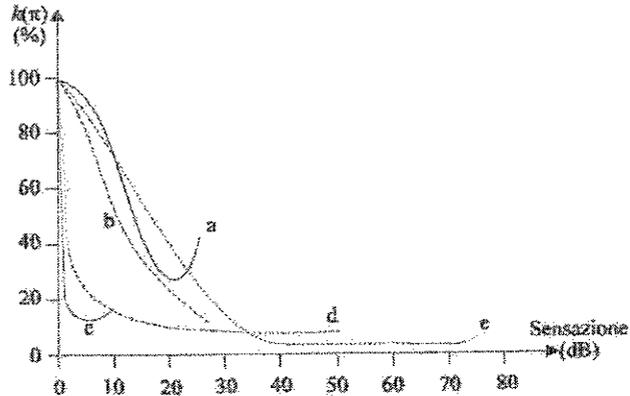


FIGURA VI.18 Rappresentazione grafica della costante di Weber (normalizzata rispetto alla soglia) in funzione dell'intensità dello stimolo per cinque modalità sensoriali: gusto con soluzione di NaCl (a), olfatto con gomma indiana (b), tatto con pressione cutanea (c), udito con tono puro ad 1 KHz (d) e visione con una lunghezza d'onda di 605 nm (e).

dalla (VI.6)):

TABELLA VI.3 Valori tipici della costante di Weber calcolati per $\pi=0.75$.

Stimolo			$k(0.75)$
Tipo	Ampiezza	Canale sensoriale	
Pressione diffusa	400 g	Recettori cutanei	0.013
Pressione puntuale	5 g/mm ²	Recettori di Pacini	0.136
Peso	300 g	Recettori muscolari Recettori articolari	0.019
Luminosità	1000 Fotoni	Fotorecettori	0.016
Frequenza (100 dB SPL)	1 KHz	Recettori uditivi	0.088
Odore (gomma indiana)	200 Olf	Recettori olfattivi	0.093
Gusto	3 mole/litro	Recettori gustativi	0.200

Legge di Weber-Fechner

Negli anni successivi alla postulazione della legge di Weber, Fechner si propose di dare a tale relazione una formulazione teorica, dato che la legge di Weber è di tipo empirico. Per poter costruire questa base teorica, Fechner si pose il problema di definire una scala di misura delle sensazioni a partire da dati sperimentali sulle soglie differenziali di discriminazione.

Con procedimento simile a quello matematico di risoluzione dell'equazione differenziale, Fechner si propose di definire le proprietà globali di un canale

percettivo a partire dalle sue proprietà differenziali locali. Va precisato che in generale il metodo da lui proposto non è né corretto matematicamente, né coerente con le sue stesse premesse, tuttavia nel caso che esamineremo la soluzione operata da Fechner è valida per le ipotesi imposte.

Per come abbiamo definito la $\Delta(S, \pi)$ attraverso la (VI.5) si ha che lo stimolo $X_1 = S_1 + \Delta(S_1, \pi)$ sarà giudicato maggiore di S_1 con probabilità π , analogamente lo stimolo $X_2 = S_2 + \Delta(S_2, \pi)$ sarà giudicato maggiore di S_2 con probabilità π . Consideriamo ora le due differenze $X_1 - S_1$ e $X_2 - S_2$, esse sono correttamente individuate dalla stessa probabilità π , quindi la differenza fra le sensazioni indotte da X_1 e S_1 deve essere uguale alla differenza delle sensazioni indotte da X_2 e S_2 . Se indichiamo con $\bar{S} = \Psi(S)$ la funzione psicofisica (o scala sensoriale) dello stimolo in una ipotetica misura soggettiva, possiamo considerare le seguenti relazioni:

$$\left. \begin{array}{l} X_1 = S_1 + \Delta(S_1, \pi) \\ X_2 = S_2 + \Delta(S_2, \pi) \end{array} \right\} \rightarrow \Psi(X_1) - \Psi(S_1) = \Psi(X_2) - \Psi(S_2)$$

Indicando con $g(\pi)$ il valore costante della differenza $\Psi(X) - \Psi(S)$ per ogni coppia (X, S) e tale che $X = S + \Delta(S, \pi)$ ed assumendo valida la legge di Weber espressa dalla (VI.6) si può scrivere catena di rapporti:

$$\frac{\Psi(X) - \Psi(S)}{X - S} = \frac{g(\pi)}{\Delta(S, \pi)} = \frac{g(\pi)}{k(\pi)S + C(\pi)}$$

Passando al limite si ricava la seguente relazione differenziale:

$$\frac{d\Psi(S)}{dS} = \frac{g(\pi)}{k(\pi)S + C(\pi)}$$

la cui soluzione è:

$$\Psi(S) = \frac{g(\pi)}{k(\pi)} \log \left(S + \frac{C(\pi)}{k(\pi)} \right)$$

Questa relazione, nota sotto il nome di *legge di Weber-Fechner* esprime il concetto fondamentale che differenze notate con uguale probabilità sono uguali (a meno che tali differenze sia notate con probabilità unitaria o nulla).

LEGGI DI STEVENS

Negli ultimi quaranta anni, S.S. Stevens ha sviluppato un'altra teoria assumendo che per grandezze additive (protetiche) la scala "corretta" delle sensazioni sia fornita dalle tecniche di rapporto, cioè stimoli che sono in rapporto costante producono sensazioni che sono in rapporto costante. Tale formulazione è esprimibile dalla seguente relazione:

$$\frac{X_1}{X_2} = \frac{X_3}{X_4} \rightarrow \frac{\Psi(X_1)}{\Psi(X_2)} = \frac{\Psi(X_3)}{\Psi(X_4)} \quad (\text{VI.7})$$

Si può allora dimostrare che la (VI.7) viene verificata da una $\Psi(S)=\alpha S^\beta$. Infatti, la condizione di rapporto costante può essere espressa con:

$$\frac{\Psi(X_1)}{\Psi(X_2)} = \delta \left(\frac{X_1}{X_2} \right) \quad (VI.8)$$

Ricavando $\Psi(X_1)$ ed imponendo $X_2=1$ si ottiene:

$$\Psi(X_1) = \Psi(1)\delta(X_1) \quad (VI.9)$$

Se consideriamo due valori Z e Y dello stimolo ed assumiamo $X_1=ZY$ e $X_2=Z$, dalla (VI.8) e dalla (VI.9) si ricavano:

$$\begin{aligned} \Psi(ZY) &= \Psi(Z)\delta(Y) \\ \delta(ZY) &= \Psi(Z)\delta(Y) / \Psi(Z) \end{aligned}$$

ed utilizzando ancora la (VI.9) si ricava:

$$\delta(ZY) = \delta(Z)\delta(Y)$$

La soluzione di questa equazione, ponendo $\Psi(1)=\alpha$ e $Z=S$ è chiamata *legge delle potenze di Stevens* ed espressa dalla seguente catena di uguaglianze:

$$\Psi(S) = \Psi(1)\delta(S) = \alpha S^\beta$$

La legge delle potenze è stata applicata a un gran numero di risultati sperimentali relativi a molti canali sensoriali e si è osservato che le stime dell'esponente β variano considerevolmente secondo la nocività soggettiva della stimolazione (figura VI.19). Va sottolineato, tuttavia, che il metodo con cui la legge viene ricavata

segue esattamente la stessa procedura logica di Fechner ed è quindi esposta alle stesse critiche: entrambe sono basate su un postulato di invarianza che, naturalmente, non può essere verificato. In entrambi i casi i principi di invarianza rappresentano vere e proprie definizioni delle scale corrispondenti.

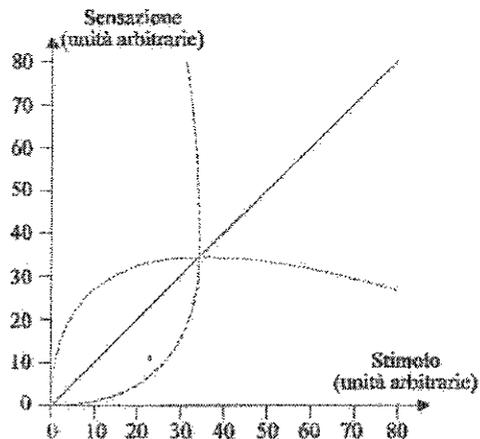


FIGURA VI.19 Funzioni psicofisiche ottenute con la legge di Stevens applicando stimoli differenti: elettro shock alle dita (60 Hz), $\beta=3.5$ (linea tratteggiata); misure di lunghezza, $\beta=1.1$ (linea continua); misure d'intensità luminosa, $\beta=0.33$ (linea tratteggiata fine).