Elementi di Psicofisica

Dispensa per il corso “Percezione e Psicofisica”, Corso di Laurea Specialistica in “Psicobiologia e Neuroscienze Cognitive”, Università di Parma.

terza versione

© Nicola Bruno (2016)

non citare senza il permesso dell’autore

0. Indice

1. Premessa p. 3
2. A cosa serve la psicofisica p. 3
3. Le due idee fondamentali p. 4
4. Sensibilità e soglie: la legge di Weber p. 5
5. La legge di Weber-Fechner p. 8
6. La legge psicofisica di Stevens p. 12
7. I tre metodi di Fechner e la soglia assoluta p. 14
    7.1 Metodo dell'aggiustamento p. 15
    7.2 Metodo dei limiti p. 16
    7.3 Metodo degli stimoli costanti p. 17
8. Detezione e discriminaziione p. 19
9. Il PES p. 20
    9.1 Con il metodo degli stimoli costanti p. 22
    9.2 Con il metodo dei limiti p. 23
    9.3 Con il metodo dell'aggiustamento p. 24
10. Il metodo della staircase p. 24
11. I metodi di Stevens p. 28
12. La teoria della detezione del segnale p. 29
13. Glossario p. 34
14. Bibliografia p. 36

1. Premessa

Lo scopo di questa dispensa è illustrare i principali metodi psicofisici utilizzati nello studio della percezione. Alcuni accenni al tema sono presenti anche nel manuale di Wolfe et al (2014, pp. xx), di cui raccomando comunque la lettura. In questa dispensa lo stesso materiale viene ripreso e discusso in maniera più tecnica, a complemento e integrazione delle lezioni. Segnalazioni di errori, omissioni, o formulazioni non chiare sono particolarmente bene accette. La dispensa presuppone una conoscenza di base della statistica descrittiva e delle distribuzioni teoriche di probabilità. In caso di difficoltà specifiche contattare il docente all'indirizzo nicola.bruno@unipr.it. Tutte le analisi e i grafici sono stati creati con il software DataDesk® (Velleman, 1997) e con il software open-source R (vedi Venables, Smith, and the R Core Team, 2012). Tutti i termini tecnici sono definiti, oltre che nel testo, in un glossario che include anche il link a risorse in rete per approfondimenti ed esempi.

2. A cosa serve la psicofisica

Per studiare la percezione filosofi e scienziati per lungo tempo hanno avuto a disposizione il solo strumento dell'introspezione: osservare e descrivere a parole quello che vediamo, sentiamo, tocchiamo. Ad esempio, molte osservazioni introspettive sulla percezione si trovano nelle opere di Aristotele. La descrizione accurata della propria esperienza percettiva (fenomenologia) rappresenta un ottimo punto di partenza per lo studio della percezione. Il modello di una funzione percettiva dovrebbe sempre rendere giustizia alla fenomenologia: se l'output del modello non corrisponde o corrisponde solo in parte al percetto, il modello non è corretto. Ma per quanto la fenomenologia possa dare indicazioni importanti, si sono dei limiti. Innanzi tutto, molti aspetti della percezione hanno a che fare con processi automatici e non coscienti. In secondo luogo, l'utilizzo dei metodi delle scienze naturali e in particolare del metodo sperimentale richiede la raccolta di misure quantitative e potenzialmente replicabili. A questo scopo, la

psicologia e le neuroscienze cognitive utilizzano i metodi della psicofisica.

3. Le due idee fondamentali

Alla base di tutti i metodi psicofisici, sia classici sia contemporanei, vi sono due concetti molto generali. Pur essendo semplici da capire, questi due concetti si rivelano straordinariamente utili per risolvere quella che sembra, di primo acchito, una difficoltà insuperabile: noi usiamo la percezione, fra le le altre cose, per rappresentare nella nostra coscienza il mondo esterno, per avere delle *esperienze fenomeniche.* Ma queste esperienze sono intrinsecamente private: tu mi dici che vedi un quadrato rosso, ma io non ho maniera di sapere come è fatto davvero il contenuto della tua coscienza quando dici di vedere un quadrato rosso. Anche io vedo un quadrato rosso, ma cosa mi garantisce che i contenuti delle nostre rispettive coscienze siano uguali?

Il primo dei due concetti riguarda l'osservazione che stimoli fisicamente diversi possono essere percettivamente indistinguibili. Questa osservazione viene detta *metamerismo*. Un esempio semplice è quanto avviene osservando miscele di luci colorate nello strumento chiamato anomaloscopio, ampiamente utilizzato nello studio dei modelli colorimetrici e in clinica per la diagnosi delle anomalie della visione cromatica. L'anomaloscopio è dotato di un campo circolare diviso in due semicerchi uguali. Fonti luminose indipendenti illuminano le due zone, e opportuni filtri monocromatici consentono di controllare la composizione spettrale delle luci presentate. In molte condizioni, miscele diverse nei due campi appaiono esattamente dello stesso colore (sono metameriche), tanto che il bordo che divide i due campi scompare. Un altro esempio si può ottenere osservando, con un occhio solo e la testa ben ferma, due dischi luminosi fisicamente di diversa grandezza in una stanza completamente buia. Aggiustando opportunamente la distanza del disco grande (che deve essere più lontano dal punto di vista) rispetto a quella del disco piccolo (che deve essere più vicino), è possibile individuare una situazione in cui le dimensioni apparenti

dei due dischi sono indistiguibili. L'idea di metamerismo è alla base della misura dei cosiddetti *punti di eguaglianza soggettiva* (PES).

Il secondo concetto è quello di *sensibilità.* Il funzionamento di un processo percettivo è bene caratterizzato dalla sua capacità di rilevare differenze fra stimoli diversi. Quando questa capacità è elevata, stimoli anche poco diversi fisicamente sono chiaramente distinguibili. Se invece è bassa, stimoli anche molto diversi appaiono uguali. Ad esempio, siamo molto sensibili a piccole variazioni di intensità di una luce debole; mentre siamo molto meno sensibili alle stesse piccole variazioni se applicate ad una luce intensa (legge di Weber, vedi sotto). La sensibilità varia a seconda del canale sensoriale impiegato e a seconda del suo stato di adattamento. Nei metodi classici, inoltre, la sensibilità è strettamente legata al concetto di soglia (anche questo ripreso sotto). Soglie basse implicano alta sensibilità, e viceversa. Nella Teoria della Detezione del Segnale (anche questa discussa più avanti), un metodo sviluppato più di recente, la sensibilità è invece legata alla capacità di rilevare un segnale in un contesto di rumore, commettendo pochi falsi positivi nelle risposte.

4. Sensibilità e soglie: la legge di Weber

Utilizzando i concetti di metamero e di sensibilità, possiamo quantificare l'esperienza cosciente per mezzo di operazioni che generano dati osservabili. L'idea è semplice. Quando io e te osserviamo una situazione stimolo, le qualità fenomeniche dei nostri percetti (la "rossità" del colore rosso, la forma del quadrato) e rimarranno sempre accessibili solo alle nostre rispettive menti. Ma anche se non posso entrare dentro la tua mente per accedere direttamente alla tua coscienza, posso concordare con te che componenti della situazione stimolo appaiono uguali, o diverse. Posso inoltre descrivere, con una certa approssimazione, quanto diverse: la luce A è due volte più intensa della luce B, il peso C è un terzo del peso D. Misurando punti di eguaguaglianza soggettiva e sensibilità, è possibile comprendere come è fatta la struttura delle esperienze fenomeniche coscienti, descrivendo le

leggi che regolano le *relazioni* fra i percetti e gli stimoli fisici.

Il termine psicofisica, coniato dal fisico e filosofo tedesco Gustav Theodor Fechner (1801-1887), si riferisce appunto allo studio quantitativo delle relazioni fra le variabili fisiche e le corrispondenti variabili psicologiche. Il punto di partenza del lavoro di Fechner furono una serie di osservazioni dovute al fisiologo suo compatriota Ernst Weber (1795-1878). Studiando compiti di discriminazione fra stimoli sensoriali, come ad esempio due pesi presentati simultaneamente alla mano destra e alla mano sinistra dei partecipanti ai suoi esperimenti, Weber si accorse che la sensibilità, intesa come capacità di rilevare la differenza fra due stimoli, non è costante ma è invece inversamente proporzionale all'intensità fisica dello stimolo di riferimento. Questa relazione, spesso chiamata legge di Weber, è uno dei principi fondamentali della percezione.

Per chiarire il significato della legge di Weber consideriamo un esempio. Supponiamo di presentare alla mano destra dei partecipanti un peso di 1 kg (1000 grammi). Chiamiamo questo lo stimolo di riferimento o standard. Presentando ora alla mano sinistra una serie di stimoli di confronto (test) possiamo determinare il valore della *soglia differenziale,* l'incremento minimo di peso che rende percepibile la differenza fra i due stimoli. Ad esempio, la differenza fra lo standard e uno stimolo test di 1010 grammi non viene mai percepita. Al contrario, la differenza con 1100 grammi viene percepita sempre, quella con 1090 quasi sempre, quella con 1080 un po' meno spesso, e così via. Stabilito un criterio statistico per fissare il valore della soglia (torneremo su questo nella prossima sezione), potremo arrivare ad affermare che la soglia differenziale per un peso di 1000 grammi è circa di 20 grammi, ossia che una persona in media è sensibile ad una differenza di questa entità ma non a differenze più piccole. Ripetiamo ora la prova con uno standard di 5 kg. Troveremo ora che i partecipanti non sono sensibili a differenze di soli 20 grammi, ma che occorre aumentare il test di circa 100 grammi perché la differenza sia rilevabile. Ripetendo l'osservazione con altri

pesi, ci accorgeremo che la sensibilità diventa sempre meno buona (la soglia differenziale diventa sempre più alta) al crescere dell'intensità del peso standard. Questa è appunto la legge di Weber.

Ripetendo i suoi esperimenti, Weber si accorse anche che la relazione di proporzionalità fra soglia differenziale e intensità dello stimolo poteva cambiare a seconda del canale sensoriale studiato e del compito. Nel caso del confronto simultaneo fra due pesi, come abbiamo appena visto, la soglia differenziale è pari a circa il 2% dell'intensità di riferimento. Nel caso del confronto fra luci di diversa intensità, circa all'8%. In quello del confronto fra suoni di diversa intensità, circa al 5%. In tutti i casi studiati, tuttavia, i dati erano in buon accordo col principio:

$$\Delta I \ / \ I = k$$

dove ΔI è la soglia differenziale, I è l'intensità dello stimolo di riferimento, e k è la *costante di Weber.* Attenzione qui a un dettaglio che è talvolta fonte di confusione. La costante di Weber è una costante caratteristica di un canale sensiorale, misurato in determinate condizioni. Quindi è diversa a seconda del canale che si misura. Dunque la costante di Weber è costante per un canale misurato, ma variabile a seconda di cosa si misura!

Che la capacità discriminativa (misurata dalla soglia differenziale) tenda a diventare sempre peggiore al crescere dell'intensità dello stimolo è una proprietà generale dei sistemi sensoriali. Si tratta infatti di una proprietà molto utile per qualsiasi organismo che debba essere in grado di rispondere a stimoli che possono presentarsi a molti livelli diversi di scala. In una situazione in cui devo lavorare con oggetti leggeri, rilevare differenze di peso pari a pochi grammi è sicuramente rilevante. Ma se devo sollevare valige di molti chili, rilevare differenze così piccole non è utile, mentre possono essere importanti differenze di qualche etto. La legge di Weber riflette quindi un aspetto adattivo della percezione: dato un sistema biologico

che ha risorse limitate, è efficiente dotarlo della possibilità di modificare la sensibilità in funzione dell'ordine di grandezza dello stimolo.

5. La legge di Weber-Fechner

Le osservazioni di Weber furono sviluppate da Fechner in due importanti direzioni. La prima fu l'ideazione di tre paradigmi per misurare le soglie: i metodi degli *stimoli constanti,* dei *limiti* e dell'*aggiustamento.* I tre metodi vengono ancora largamente utilizzati sia per misurare le soglie, sia per misurare i punti eguaglianza soggettivi. Nella sezione successiva vedremo in dettaglio come funzionano. La seconda direzione fu lo sviluppo del concetto di *funzione (o legge) psicofisica.* Fechner, pur essendo di formazione un fisico (o forse proprio perché lo era) nutriva un profondo interesse per il problema mente-corpo. Ritenendo che lo studio scientifico di questo problema richiedesse prima di tutto la possibilità di misurare oggettivamente le variabili mentali, egli scorse nel lavoro di Weber una maniera per affrontare questo problema. Propose che le relazioni fra i percetti e le corrispondenti variabili fisiche potessero essere rappresentate da funzioni in cui una dimensione ha l'unità di misura fisica appropriata (ad esempio grammi, o centimetri) e l'altra viene invece misurata in unità derivate a partire dalle soglie differenziali. Un po' come dire, così come posso esprimere la misura di una intensità fisica come multiplo di una intensità standard di riferimento, alla stessa maniera posso esprimere l'intensità percepita come numero di soglie differenziali al di sopra della soglia assoluta. Ad esempio, una lunghezza fisica può venire misurata in metri, ossia multipli di una lunghezza standard detta metro. L'intensità fisica di una luce può venire misurata in candele per metro quadrato, ossia di nuovo come multiplo di una intensità standard (definita in modo un po' più complicato rispetto al metro). Le corrispondenti sensazioni saranno misurate invece da un numero che corrisponde al numero di soglie differenziali, sopra la soglia assoluta, a cui si colloca la corrispondente intensità fisica. Per questo numero si usa talvolta anche il termine JND *(just-noticeable-difference,* differenza appena

percepibile). Ad esempio, se la soglia differenziale per un peso di 1000g è 20g, diremo che uno stimolo di 1020g (unità fisiche) è 1 JND (unità psicologiche) sopra il peso di 1000g. Soglie differenziali e JND sono imparentate, ma attenzione a tenerle distinte dal punto di vista concettuale!

Partendo dalla legge di Weber, Fechner ricavò analiticamente un modello matematico della funzione psicofisica. Il ragionamento è il seguente. La legge di Weber implica che incrementi uguali in unità psicologiche corrispondono a incrementi (soglie differenziali) sempre maggiori in unità fisiche. Questo corrisponde a dire che l'incremento nella sensazione elicitato da un certo incremento di intensità fisica non è lineare, ma è una curva che cresce rapidamente a i valori fisici più bassi e poi sempre meno rapidamente (funzione accelerata negativamente). Fechner espresse questo principio con una equazione differenziale:

$$\mathrm{d}s = c\ \mathrm{d}I\ /\ I$$

dove ds è la variazione nella sensazione percepita, dI è la variazione nell'intensità fisica, I è l'intensità di partenza, e c è un parametro che dipende dall'unità di misura fisica e dalla costante di Weber. Integrando entrambi i membri dell'equazione si ottiene che

$$s = c\ \log(I) + C$$

dove C (maiuscolo, diverso da c) è una costante di integrazione. Per trovare il suo valore, supponiamo che I sia al livello della minima intensità dello stimolo che può essere rilevata (la soglia assoluta) I_0. Se I è al livello della soglia assoluta non c'è sensazione, per cui s = 0 e C è

$$C = -c\ \log(I_0)$$

Sostituendo nella formula precedente, raccogliendo a fattore *c,* e infine sfruttando il fatto che una differenza fra logaritimi è uguale al logaritmo del rapporto, otteniamo

$$s = c \log(I / I_0)$$

che è l'espressione formale della legge di Weber-Fechner. Ponendo per convenzione $I_0 = 1$, otteniamo

$$s = c \log(I)$$

Quest'ultima espressione è quella che viene riportata più di frequente della legge di Weber-Fechner, e si legge così: l'intensità percepita è proporzionale al logaritmo dell'intensità fisica. Un esempio è presentato nella Figura 1 alla pagina seguente.

Le funzioni psicofisiche hanno molte applicazioni pratiche perché descrivono, con un'ottima approssimazione, come le percezioni di un osservatore tipico cambieranno al variare di uno stimolo fisico Ad esempio, funzioni di questo tipo vengono utilizzate, in ambito clinico, per la valutazione clinica della funzionalità uditiva, o ancora in contesti ingegneristici per tarare la regolazione del "volume" negli apparati per la riproduzione delle musica. Dato che la legge di Weber-Fechner non è ricavata da dati empirici, ma ricavata analiticamente dalla legge di Weber, la bontà dell'approssimazione dipende da quest'ultima. La generalizzazione empirica proposta da Weber è approssimativamente corretta per una gamma ampia di forme di energia stimolante, ma lo è tipicamente solo quando l'intensità dello stimolo non è troppo bassa o troppo alta. Avvicinandosi agli estremi dei continua di intensità fisica, si osservano deviazioni via via più

grandi dalle previsioni della legge di Weber. Di conseguenza, anche la legge di Weber-Fechner descrive meno bene la forma della funzione psicofisica.

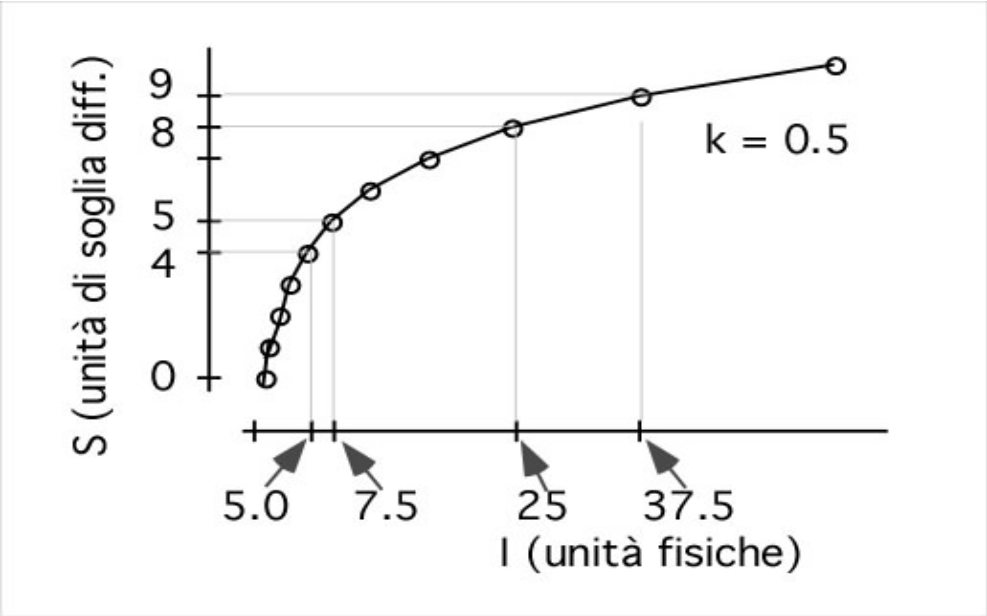

Figura 1. La forma della funzione psicofisica fechneriana quando la costante di Weber = 0.5. L'origine della curva corrisponde alla capacità di discriminare la presenza di uno stimolo dalla sua assenza, o soglia assoluta (S0). A uguali incrementi di intensità percepita (S1-S0 = S2-S1= S3-S2.... .) in unità di JND corrispondono uguali rapporti fra intensità fisiche (I1/I0 = I2/I1 = I3/I2.....), quindi l'intensità percepita non è proporzionale all'intensità fisica ma al suo logaritmo.

La legge di Weber-Fechner trova applicazione in tutti i problemi in cui è rilevante mappare una dimensione fisica a una dimensione di natura percettiva. Un esempio è l'intensità percepita di un suono (*loudness),* la cui relazione con l'intensità fisica (la "potenza" del suono, misurata dall'ampiezza di un'onda sonora elevata al quadrato) obbedisce alla legge di Weber-Fechner. L'intensità percepita di un suono si misura con la scala decibel *sound-pressure level (SPL)*, dove per *SPL* si intende un livello di potenza pari alla soglia assoluta

$$SPL = I_0$$

e la scala decibel SPL è definita da:

$$dB_{SPL} = 10 \log_{10}(P/P_0)$$

che è analoga all'espressione formale della legge di Weber-Fechner (vedi sopra), per cui approssimativamente 1 dB_{SPL} = 1 JND.

6. La legge psicofisica di Stevens

Dopo i contributi pionieristici di Fechner, altre ricerche hanno cercato di determinare la migliore descrizione matematica delle funzioni psicofisiche in diverse condizioni. Fra queste va segnalato in particolare il contributo dell'americano Stanley Smith Stevens (1906-1973), uno dei maggiori teorici della misurazione in psicologia del secolo scorso.

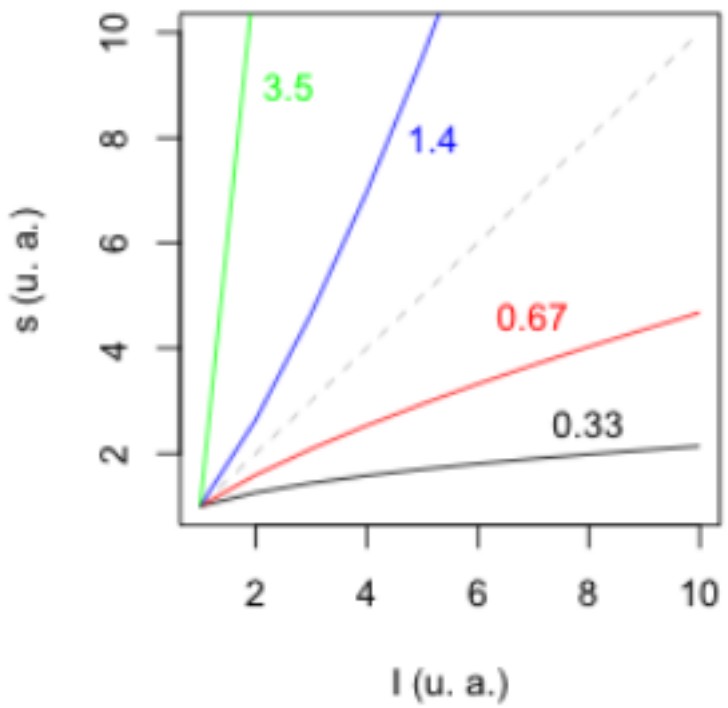

Figura 2. Funzioni psicofisiche (funzioni potenza) secondo Stevens. Gli esponenti sono indicati nel grafico. Per semplicità si assume che c = 1 (stessa unità di misura per tutte, u.a. = unità arbitrarie). La retta grigia tratteggiata è la funzione potenza con esponente 1.

Utilizzando metodi diversi da quelli utilizzati da Fechner, Stevens propose che la forma generale delle funzioni psicofisiche non è la curva logaritmica di Fechner ma una famiglia di curve in cui l'intensità della sensazione è proporzionale all'intensità fisica elevata a esponenti caratteristici del canale sensoriale indagato *(funzioni potenza).* La forma generale della legge di Stevens è

$$s = c\ I^a$$

dove *s* è l'intensità della sensazione, *I* l'intensità fisica dello stimolo, *c* è una costante di proporzionalità che dipende dall'unità di misura dello stimolo, e *a* è un esponente che dipende dal tipo di stimolo che viene misurato. Grazie ai metodi da lui sviluppati, che si caratterizzano per una notevole semplicità e flessibilità di utilizzo, Stevens misurò l'esponenente caratteristico di un gran numero di forme di stimolazione fisica (Figura 2).

Ad esempio, l'esponente relativo alla sensazione di intensità uditiva (*loudness),* misurato con un'onda sonora di 3000 Hz, è 0.67. Quello relativo alla sensazione di chiarezza (*brightness),* riferita ad un disco luminoso di 5 gradi di angolo visivo in una stanza buia, è 0.33. Esponenti minori di 1 producono funzioni psicofisiche corrispondenti a curve in cui la sensazione crese velocemente all'inizio e poi sempre più lentamente. Quindi queste curve, pur avendo forma diversa, esibiscono una "compressione" della dimensione psicologica al crescere di quella fisica proprio come la funzione logaritmica di Weber-Fechner. Studiando altre forme di stimolazione, Stevens trovò tuttavia anche casi in cui l'esponente è maggiore di 1. Ad esempio, l'esponente per la sensazione di salato, misurata stimolando la lingua con una piccola quantità di cloruro di sodio, è 1.4. Quella per la sensazione associata ad uno shock elettrico, misurata con una corrente

applicata alle dita, è addirittura 3.5. Esponenti maggiori di 1 producono curve molto diverse da quelle di Fechner, in cui l'intensità della sensazione cresce molto rapidamente al crescere dell'intensità fisica, ossia esibiscono una "espansione" della risposta.

Stevens riteneva che la funzione potenza sia il modello migliore per descrivere le relazioni psicofisiche, proprio perché capace di prevedere sia risposte "compressive" sia risposte "espansive". Queste ultime non possono essere catturate da una funzione logaritmica, e per questo motivo sembra corretto concludere che la legge di Stevens ha caratteristiche di maggiore generalità. I critici di Stevens hanno fatto notare tuttavia che i risultati da lui ottenuti dipendono in maniera critica dai metodi utilizzati per ottenere le funzioni (li vediamo a breve). Inoltre l'approccio di Stevens era basato sulla misura delle risposte di molti partecipanti, di cui poi venivano calcolate le medie e a partire da queste medie veniva stimato il modello matematico. Questa strategia non garantisce che, per tutti gli individui misurati, l'esponente fosse lo stesso o addirittura che la forma della funzione psicofisica fosse effettivamente una funzione potenza.

7. I tre metodi di Fechner e la misura della soglia assoluta

I metodi psicofisici per la misura della sensibilità e dei punti di eguaglianza soggettivi formano ancora oggi la base per la gran parte delle ricerche in psicologia e nelle neuroscienze cognitive. Esaminiamo prima di tutto come i metodi sviluppati da Fechner siano utilizzati per la misura della *soglia assoluta,* l'intensità minima di uno stimolo in grado di produrre una sensazione.

7.1 Metodo dell'aggiustamento

Si tratta del metodo più semplice e veloce. Il partecipante dispone di una maniera di modificare direttamente l'intensità dello stimolo lungo la dimensione di interesse. Ad esempio, con un potenziometro modifica l'intensità di un disco luminoso. L'intensità viene posta all'inizio di ogni prova a un valore molto alto (prove discendenti, si presume che il soggetto scenda

verso la soglia) o molto basso (ascendenti). Il partecipante la aggiusta fino al punto in cui è appena percepibile. La prova viene ripetuta numerose volte. La soglia assoluta è la media aritmetica delle intensità scelte, o qualche altra misura di tendenza centrale se più appropriato. Occorre che il numero di prove ascendenti e discendenti sia uguale per controbilanciare la tendenza a perseverare nella risposta precedente quando ci si avvicina alla soglia *(isteresi).* Quando è necessario misurare la soglia molto rapidamente questo metodo è l'unico possibile. Ad esempio, per studiare l'adattamento al buio è necessario misurare la soglia assoluta in momenti successivi e farlo in fretta perché l'adattamento continua a cambiare.

7.2 Metodo dei limiti

Il metodo dei limiti è una variante discreta del metodo dell'aggiustamento. Vengono creati stimoli a diversi livelli discreti di intensità. Questi vengono presentati in sequenza in serie discendenti o ascendenti, e per ognuno il partecipante indica se ha visto o non ha visto qualcosa (compito di *detezione)*. La soglia viene stimata calcolando la media aritmetica dei valori in cui il partecipante cambia la risposta da "visto" a "non visto", o viceversa per le serie ascendenti. Come per il metodo dell'aggiustamento, e per lo stesso motivo, le serie ascendenti e discendenti devono essere in ugual numero.

Il metodo dei limiti è basato su una procedura di somministrazione molto semplice da gestire, e i risultati possono essere rapidamente interpretati quasi senza fare calcoli. Per questo motivo rappresenta una alternativa utile quando è necessario avere una rapida idea della zona in cui si trova la soglia. Si presta meno bene ad una stima precisa per due motivi: i punti di inversione sono spesso alterati non solo dagli effetti di isteresi, per cui nelle serie discendenti le inversioni tendono ad accadere sistematicamente più tardi che in quelle ascedenti, ma anche da veri e propri errori da aspettativa. Infatti la presentazione ripetuta di stimoli graduati soprasoglia è molto diversa dalla presentazione sottosoglia: nel primo caso si

genera una aspettativa sulla presenza dello stimolo, nell'altro non si genera alcuna aspettativa perché il partecipante non sa se lo stimolo c'era o non c'era. Inoltre, non è infrequente con il metodo dei limiti che attorno alla soglia si verifichino più inversioni; il partecipante ad esempio passa da "non visto" a "visto" ma poi ritiene di avere sbagliato e torna a "non visto" e solo successivamente nella serie ascendente si stabilizza sulla risposta "visto". La presenza di più inversioni rende problematico decidere quale vada usata per il calcolo della media. In generale dunque il metodo dei limiti si presta bene a una rapida valutazione di dove si colloca approssimativamente la zona di incertezza nella detezione, ma non consente una misura precisa della sensibilità.

7.3 Metodo degli stimoli costanti

Il metodo degli stimoli costanti, infine, è simile a quello dei limiti con la differenza che i livelli discreti di intensità sono presentati in ordine casuale. Per una stima ottimale della soglia è opportuno che ogni stimolo compaia, nella serie casuale, almeno una decina di volte e non è infrequente arrivare anche a trenta ripetizioni. Al partecipante viene dunque somministrato un numero totale di stimoli pari al numero di livelli discreti utilizzati moltiplicato per il numero di ripetizioni di ogni livello. Ad ogni presentazione, il partecipante riferisce se ha visto qualcosa o meno. Per ogni livello di intensità viene quindi calcolata la proporzione di risposte "visto" e questa viene riportata in un grafico in funzione dell'intensità degli stimoli.

Pirenne (1967) ha descritto in dettaglio una ricerca in cui fu stimata l'energia minima necessaria per la visione. Questa domanda di ricerca equivale a chiedersi quale sia la soglia assoluta nelle condizioni di massima sensibilità della retina, ossia con i bastoncelli completamente adattati al buio. Nell'esperimento fu utilizzato un apparato sofisticato per controllare la fissazione, il punto in cui veniva stimolata la retina dell'osservatore, la composizione spettrale e l'intensità di un campo luminoso (vedi Figura 3). Una altrettanto sofisticata calibrazione consentiva di calcolare, per ogni

intensità utilizzata, l'energia luminosa in quanti di luce. L'esperimento utilizzava il metodo degli stimoli costanti: sei livelli diversi di intensità molto basse venivano presentati ripetutamente per 1ms in ordine casuale e ad ogni presentazione il compito dell'osservatore era riferire se avesse visto la luce o meno. I dati furono dunque registrati come percentuale di prove in cui i partecipanti davano una risposta positiva.

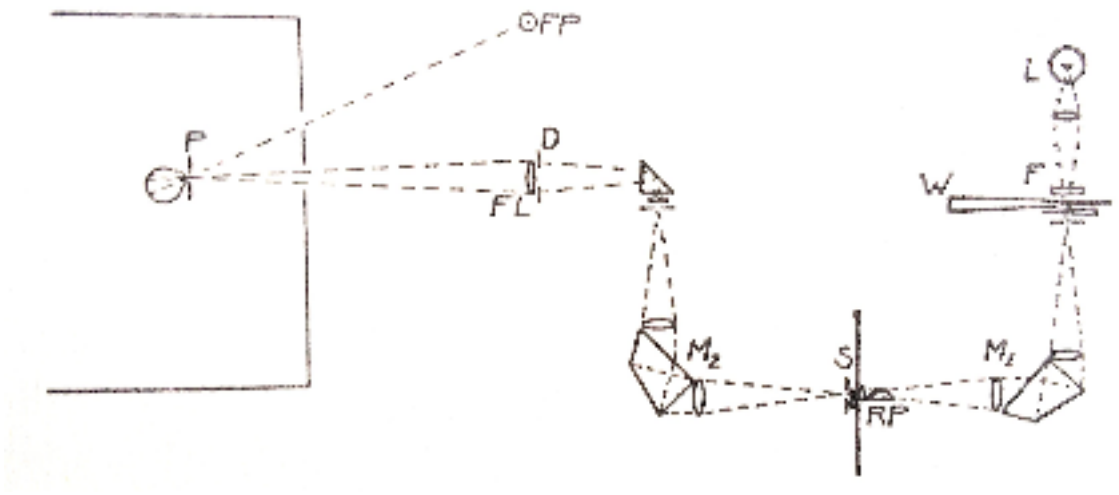

Figura 3. Apparato per misurare l'energia minima necessaria per la visione (esperimento di Hecht, Shlaer & Pirenne, 1942). L'osservatore, in una stanza completamente buia e completamente adattato al buio, è posto in P e fissa un puntino rosso FP attraverso una pupilla artificiale. La testa viene stabilizzata utilizzando un bite bar. Uno stimolo test viene presentato attraverso il diaframma D e la lente FL. La luce che illumina lo stimolo test proviene dalla lampada L, passando prima attraverso un filtro neutrale F e un cuneo W, che hanno la funzione di modulare l'intensità del flusso luminoso, e infine attraverso un doppio filtro monocromatore M1 ed M2. Grazie ai monocromatori la luce che attraversa D è una radiazione a banda molto stretta attorno a 510 nm, che è il punto di massima sensibilità dei bastoncelli. Lo stimolo test è posizionato in modo da stimolare la retina dell'osservatore in un punto a 20 gradi di angolo visivo dalla fovea, che corrisponde approsimativamente alla zona di massima densità dei bastoncelli. Il bite bar e la pupilla artificiale assicurano che questo punto sia fisso. Un otturatore S - RP controlla l'accensione della luce in D, la cui durata è fissata a 1 ms, molto al di sotto del tempo di integrazione temporale della retina. Tratto dalla Figura 6.1 in Pirenne (1967, p. 81).

Hanno partecipato all'esperimento tre osservatori (gli autori), i cui dati sono disponibili nel dataset HSP del pacchetto MPDiR di R (Knoblauch & Maloney, 2012). I risultati delle diverse sessioni completate dai tre osservatori, anche se non del tutto indentici, erano comunque molto simili

fra loro. Pertanto qui esaminiamo, a titolo di esempio, i soli dati relativi alla prima sessione completata dall'osservatore S.H. (figura 4). Come mostra la figura, probabilità che S.H. riferisca di avere visto il lampo di luce varia in funzione dell'intensità della luce secondo una caratteristica funzione a forma di S o sigmoide *(funzione psicometrica)*. Per fittare la curva ai dati, la funzione psicometrica può essere interpretata come una funzione di probabilità cumulativa. Ad esempio, possiamo considerarla la probabilità cumulativa di una funzione di densità normale, oppure, nel caso della curva fittata ai dati nella figura, di una funzione logistica (la differenza in questo caso è trascurabile). Il significato della curva è il seguente: a livelli di intensità molto al di sotto la soglia, la probabilità che il partecipante riferisca di avere visto lo stimolo è bassa; ad livelli molto sopra, invece, è alta. Attorno alla soglia, l'incertezza aumenta. Subito sotto la soglia presumibilmente ci sarà ancora una maggioranza di risposte negative ma ci saranno anche molte risposte positive. Una volta superata la soglia, le risposte positive cominceranno ad aumentare ma ci saranno ancora molte risposte negative.

Per trovare la soglia assoluta, dobbiamo trovare Il punto in cui l'osservatore è massimamente incerto nella risposta. Questo punto corrisponde al valore, sull'asse x, che corrisponde alla probabilità $p = 0.5$ sull'asse y (nel lavoro di Pirenne, i ricercatori scelsero $p = 0.6$, ma possiamo trascurare di discutere questa differenza). Il punto è ricavabile invertendo la funzione di probabilità cumulativa e trovando il quantile a cui corrisponde. Per i dati nella figura, la soglia è di poco superiore a 100 quanti di luce che arrivano nel punto della pupilla artificiale. Tenuto conto che circa l'80% della luce che arriva all'occhio viene riflesso dalla cornea, o viene assorbito dall'umor acqueo, dall'umor vitreo, e da cellule retiniche che non sono bastoncelli, la soglia assoluta misurata da Pirenne si colloca attorno a circa 20 quanti, un'energia straordinariamente bassa se si considera che 1 quanto di luce è il limite fisico al di sotto del quale non è possibile scendere. Va

sottolineato che la stima vale solo nelle condizioni dell'esperimento: per un soggetto non adattato al buio, ad esempio, sarebbe molto più alta.

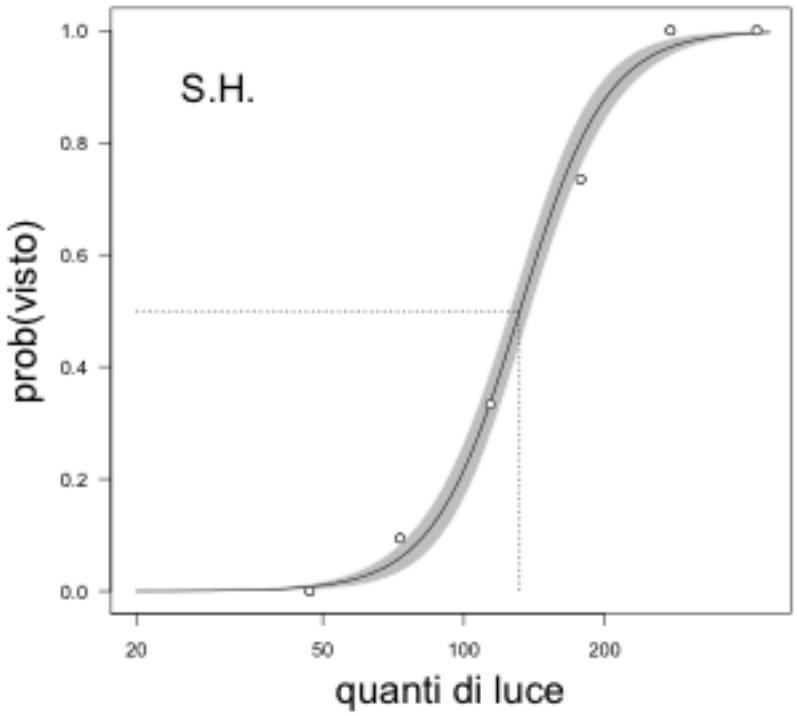

Figura 4. Funzione psicometrica relativa ad uno degli osservatori (S.H.) in una delle sessioni sperimentali dell'esperimento di Hecht, Shlaer & Pirenne (1942). I punti sono la probabilità che l'osservatore riferisca di avere visto il lampo di luce. La sigmoide fittata ai dati è una funzione logistica cumulativa, l'area grigia il suo intervallo di fiducia p = 0.95. Il punto sull'asse x che corrisponde sulla curva a p = 0.5 (rette tratteggiate) è la soglia assoluta. La distanza fra la soglia assoluta e il punto sull'asse x che corrispnde a p = 0.75 è la soglia differenziale. Si noti che l'intensità della luce è plottata su scala logaritimica.

8. Detezione e discriminazione

Nella sezione precedente abbiamo visto come i metodi di Fechner siano utilizzati per misurare i limiti inferiori della sensibilità, ossia le soglie assolute. I metodi che abbiamo visto facevano uso di compiti di *detezione,* in cui la risposta consiste nel riportare se una caratteristica dello stimolo è presente o meno (compiti si/no, *yes/no tasks).* Gli stessi metodi possono essere utilizzati per stimare la sensibilità in stimoli più intensi, ossia soprasoglia. Per fare questo vengono utilizzati compiti di *discriminazione:*

vengono presentate coppie di stimoli e i partecipanti debbono decidere quale dei due sia più intenso. Compiti come questo sono detti compiti di *scelta forzata fra due alternative* (2AFC, ossia *2-alternative forced-choice),* perché non è ammessa la risposta "uguale".

Per quanto possa apparire molto diverso, il compito di discriminazione con due stimoli è in realtà analogo al compito di detezione con uno stimolo solo. Il compito di discriminazione, infatti, non è altro che un compito di detezione di una differenza; il compito di detezione, a sua volta, non è altro che una compito di discriminazione di una caratteristica dalla sua assenza. Da questo punto di vista quindi la logica della misurazione di sensibilità è simile a quella per la misura delle soglie assolute. Fra i due compiti esiste tuttavia una differenza importante. Nel caso del compito si/no viene sempre presentato uno stimolo, per cui non c'è maniera di definire quali siano le risposte corrette. Nel compito 2AFC, invece, questo è possibile. Ad esempio, Pirenne avrebbe potuto condurre le sue misure utilizzando due presentazioni, una sola delle quali contiene uno stimolo; e avrebbe potuto chiedere ai propri osservatori di indicare quale prova lo conteneva (la prima o la seconda). Questo secondo approccio è di solito preferibile, perché consente di controllare il *bias* di risposta (vedi sezione 12).

9. Il PES

In un compito di discriminazione, è possibile misurare la sensibilità anche sopra la soglia assoluta, e quindi ricavare per via empirica la funzione psicofisica che descrive come i percetti (in unità di JND) variano al variare dell'intensità fisica. Inoltre è possibile In aggiunta alla jnd, un esperimento di discriminazione implica anche la misura di misurare un *punto di eguaglianza soggettivo* (PES). In un tipico esperimento, la discriminazione viene fatta fra uno stimolo a intensità fissa, detto *stimolo standard,* e una serie graduata di *stimoli di confronto* con intensità inferiori o superiori allo standard. Il PES rappresenta il valore di intensità in cui lo stimolo di confronto appare uguale allo stimolo standard, ovvero il punto in cui la capacità di discriminarli è

nulla. In una situazione in cui non vi sono fattori che inducono un errore sistematico, il PES tenderà collocarsi in corrispondenza del *punto di eguaglianza oggettivo* (PEO), ossia del valore di intensità in cui lo stimolo di confronto è fisicamente uguale allo stimolo standard. Consideriamo un esempio in cui il partecipante deve discriminare la lunghezza di due linee. Supponiamo che lo standard sia lungo 30 mm, e che vi siano 5 stimoli di confronto di 28, 29, 30, 31 e 32 mm. Presumibilmente, il punto in cui un osservatore avrà maggiore difficoltà a discriminare un confronto dallo standard sarà il punto in cui questo è effettivamente uguale allo standard, ossia il PEO. Ma non è detto che le cose vadano sempre così. Considerate la situazione rappresentata in Figura 5, in cui il compito di discriminazione potrebbe essere utilizzato per studiare l'illusione di Müller-Lyer. In questo caso, il PES sarà minore del PEO, a causa dell'errore sistematico indotto dalle freccie che puntano verso l'esterno.

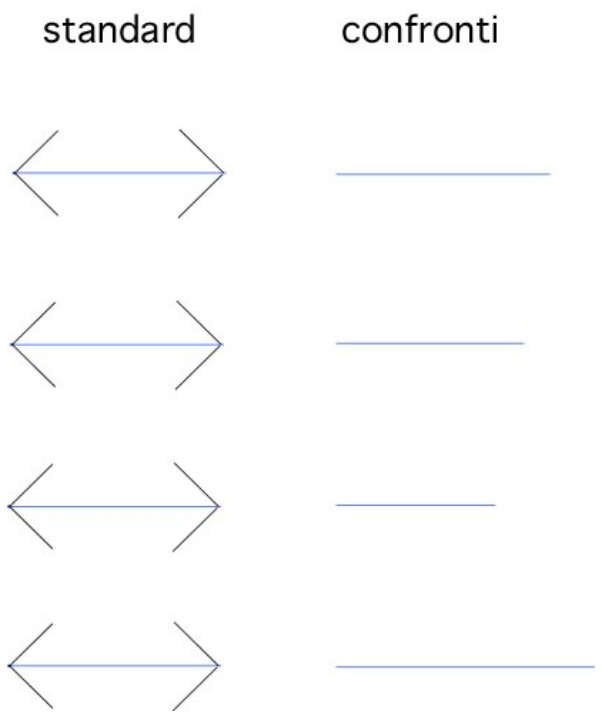

Figura 5. In quale coppia i segmenti blu appaiono avere la stessa lunghezza? La risposta più frequente è la seconda coppia dall'alto, dunque la lunghezza del secondo segmento di confronto è il PES. Tuttavia il PES non coincide con il PEO. Provate a misurare i segmenti con un righello.

9.1 Con il metodo degli stimoli costanti

Supponiamo di essere interessati a misurare una soglia differenziale per il peso di un oggetto tenuto in mano. (Come abbiamo già visto, Weber scoprì la costante proprio sperimentando con la percezione del peso). Si inizia con la scelta di una intensità standard. Questa viene confrontata con un certo numero di intensità di confronto, leggermente minori o maggiori dello standard, presentate in ordine casuale. Il compito è indicare quale dei due stimoli è più intenso (non è ammessa la risposta "uguale"). Dopo un numero abbastanza grande di prove, per ogni intensità di confronto avremo una stima della percentuale di risposte "confronto > standard". Mettendo in grafico queste percentuali otteniamo la solita funzione psicometrica sigmoide (Figura 6). A partire da questa è possibile stimare sia il PES sia la soglia differenziale.

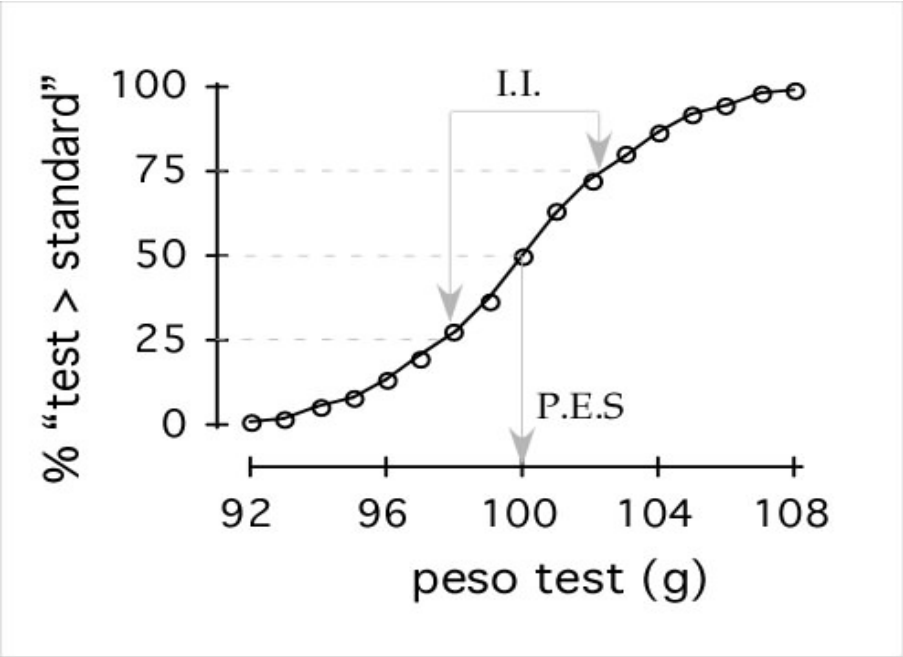

Figura 6. Una funzione psicometrica ottenuta nella misurazione della jnd e del PES con il metodo degli stimoli constanti. Il, intervallo di incertezza.

Il PES viene definito come il livello di intensità per cui il partecipante è massimamente incerto nel discriminare fra standard e confronto. La stima

del PES si effettua dunque individuando il livello di intensità che corrisponde, sulla psicometrica, al 50% di risposte in una direzione. Notate che il criterio per trovare il PES è uguale a quello per trovare una soglia assoluta. Questo non è strano se considerate che la soglia assoluta può essere considerata il valore dello stimolo in cui questo è soggettivamente uguale all'assenza dello stesso. Per la stima della jnd si ragiona invece in questa maniera. Se in corrispondenza del PES abbiamo la massima incertezza nella discriminazione, attorno al PES avremo un "gradiente di incertezza": il partecipante sarà sempre meno incerto della sua risposta quanto più l'intensità del confronto si allontana da quella dello standard. L'ampiezza delal zona in cui il partecipante è ancora incerto dipende dalla soglia differenziale: se questa è grande, la zona di incertezza sarà grande; se è piccola, viceversa. Si tratta quindi di stabilire un criterio per definire l'intervallo che definisce la zona di incertezza. Nel caso della funzione psicometrica, questo viene collocato nella gamma di intensità dello stimolo dal 25% al 75% della curva sigmoide, interpretata come una funzione di probabilità cumulativa.

9.2 Col metodo dei limiti

Come nel caso della misura di soglie assolute, nel metodo dei limiti i confronti non sono presentati a caso ma in ordine, dal più intenso al meno intenso passando attraverso il PEO (serie discendente) o dal meno intenso al più intenso (serie ascendente). In secondo luogo oltre alle risposte "più intenso lo standard" e "più intenso il confronto" in alcune varianti i partecipanti possono usare anche la risposta "uguale". Il metodo dei limiti consente dunque di stimare direttamente l'intervallo di incertezza, esaminando i livelli di intensità in cui si verificano inversioni da "maggiore" a "minore" (o da maggiore a uguale, se questa risposta era permessa) e da "minore" a "maggiore". In ogni serie si identificano le intensità a metà strada fra gli stimoli corrispondenti ad inversioni, separatamente per quelle sopra e sotto il PEO. Le medie di queste intensità sono i limiti inferiori e superiori

dell'intervallo di incertezza, e la metà dell'intervallo è la soglia differenziale. Il PES è il punto intermedio nell'intervallo di incertezza o, in alternativa la media delle risposte "uguale", se queste erano permesse.

9.3 Col metodo dell'aggiustamento

In questo caso il partecipante modifica direttamente il confronto finchè non appare uguale allo standard. Il PES è la media di tutti gli aggiustamenti effettuati, mentre per la soglia differenziale ci si basa sulla variabilità. La statistica da utilizzare è la deviazione standard degli aggiustamenti. A partire da questa, è possibile stimare un intervallo che usa il criterio del 50% come nei due metodi precedenti. Ad esempio, se la distribuzione può essere approssimata da una distribuzione normale, è possibile usare la funzione di densità normale per trovare il primo e il terzo quartile, ossia i quantili che sottendono il 50% centrale dell'area sotto la curva.

10. Il metodo della *staircase*

I metodi classici sviluppati da Fechner hanno un difetto. Infatti è necessario raccogliere molte risposte anche per stimoli poco informativi perché lontani dalla soglia. Una soluzione a questo problema è l'utilizzo di varianti "intelligenti" capaci di stimare rapidamente la zona di incertezza concentrando poi le misure soprattutto in quella zona *(metodi adattivi)*. La psicofisica moderna ha sviluppato numerosi metodi di questo tipo. In questa sezione ci occupiamo del metodo della *staircase* (scala o scalinata), di cui tutti questi metodi sono varianti.

Nel metodo della staircase, gli stimoli sono presentati in serie discendenti, partendo con stimoli molto superiori alla soglia. Il programma che gestisce l'esperimento valuta ad ogni risposta quale intensità presentare nella prova successiva, in base alla risposta. L'idea di base è semplice: se il partecipante risponde correttamente, riduci l'intensità. Se sbaglia, aumentala. Applicando questo principio, le intensità presentate convergono rapidamente sui valori attorno alla soglia, e il programma presenta ripetutamente solo questi ultimi che sono appunto quelli più informativi. Si

evita in questa maniera di presentare molte volte stimoli per i quali la risposta non darebbe informazioni utili a delimitare la zona di incertezza. Le regole per modificare adattivamente l'intensità sono di diverso tipo. La più semplice consiste nel scendere dopo una risposta positiva e salire dopo una negativa (regola *1-up, 1-down).* L'entità della riduzione o dell'aumento di intensità (il "passo" della staircase) dipende dal tipo di stimoli considerati. Molto spesso si utilizza un passo piuttosto ampio fino al primo errore, per ridurlo una volta entrati nella zona di incertezza. Infine, la procedura prevede una regola per terminare la procedura. Di solito questa consiste nel fissare un numero massimo di prove o di inversioni.

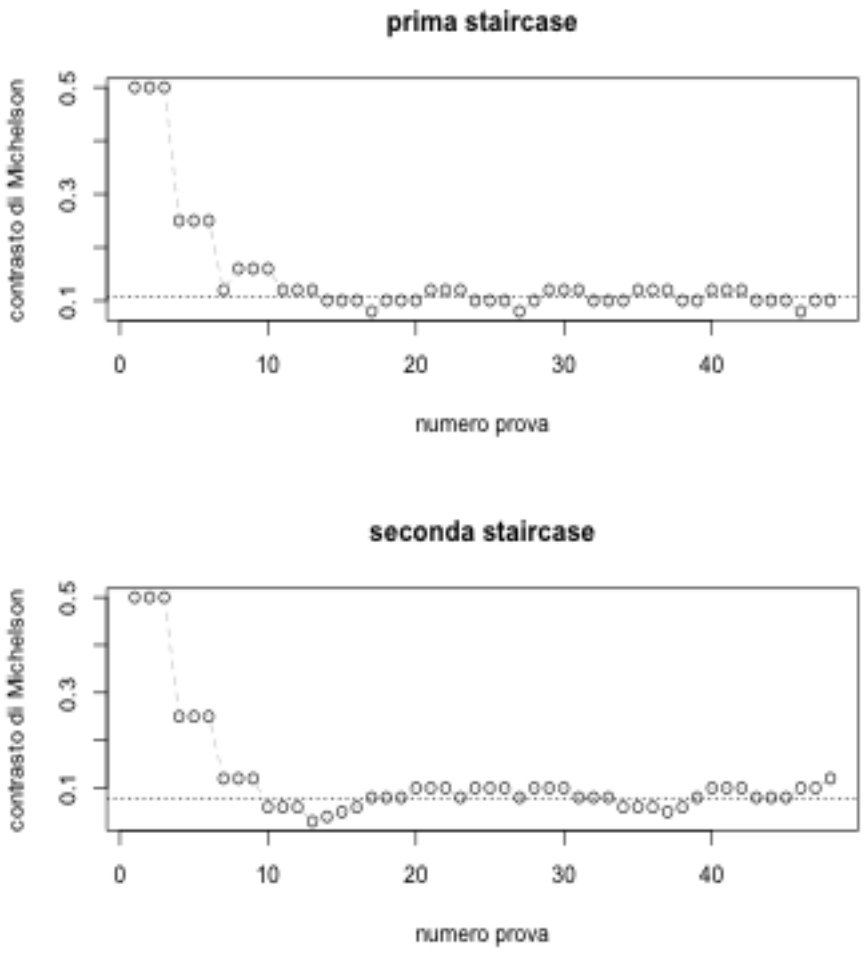

Figura 7. Due sessioni di misura della soglia per il contrasto usando il metodo della staircase con la regola 3-up, 1-down. In ongi sessione, la soglia viene misurata calcolando la media dei punti in cui la procedura inverte la direzione di modifica del contrasto (perché l'osservatore ha commesso un errore). Le soglie sono indicate dalle rette orizzontali.

Knoblauch & Maloney (2012) descrivono un esperimento di misura della sensibilità al contrasto. Venivano presentate coppie di reticoli di Gabor a frequenza spaziale fissa e contrasto variabile. I reticoli potevano avere la stessa orientazione (entrambi orizzontali o entrambi verticali) o orientazioni diverse (uno orizzontale e l'altro verticale, o viceversa). Ad ogni presentazione il partecipante doveva premere un tasto per la risposta "uguale" ed un secondo tasto per la risposta "diverso". Per ogni prova veniva registrato se la risposta era corretta o sbagliata. L'esperimento utilizzava il metodo della staircase con la regola 3-up, 1-down. Pertanto, la procedura riduceva il contrasto dopo tre risposte corrette e lo aumentava dopo una risposta sbagliata. Inoltre il contrasto veniva ridotto della metà fino al primo errore e poi di un fattore 1.26. Infine, per ridurre effetti di isteresi sono stati mescolati in modo casuale gli stimoli relativi a due staircase indipendenti (*interleaved staircases).* La prestazione di un partecipante nelle due staircase sono riassunte dai grafici nella Figura 7. Nelle prime presentazioni il partecipante non commette errori, per cui la procedura scende rapidamente verso la soglia. A quel punto il passo della staircase viene ridotto, e il contrasto delle coppie di stimoli oscilla attorno alla soglia. Il numero di prove per ogni staircase era fissato a 48, per cui l'esperimento prevedeva in totale 96 presentazioni. Il grafico indica le medie delle inversioni per ognuna delle due staircase con le rette orizzontali punteggiate. La media di tutte le inversoni in tutte le staircase è la miglior stima della soglia ed è pari in questo caso a un contrasto di Michelson uguale a 0.095.

La relazione fra il metodo della staircase e il metodo degli stimoli costanti è illustrata dalla Figura 8. Gli stimoli presentati sono in numero sufficiente per ottenere, per ogni livello di contrasto degli stimoli, una stima approssimativa della proporzione di risposte corrette. Riportando in grafico queste proporzioni in funzione del livello di contrasto (su scala logaritmica per compensare lo schiacciamento ai rapporti di contrasto più bassi), si

ottiene una funzione psicometrica non dissimile da quella già vista con il metodo degli stimoli costanti. Fittando una funzione di probabilità cumulativa Gaussiana, otteniamo una curva sigmoide analogamente a quanto fatto nella sezione 3. Trovando il quantile di questa curva quando p = 0.5 otteniamo un valore di soglia per il contrasto pari a circa 0.067.

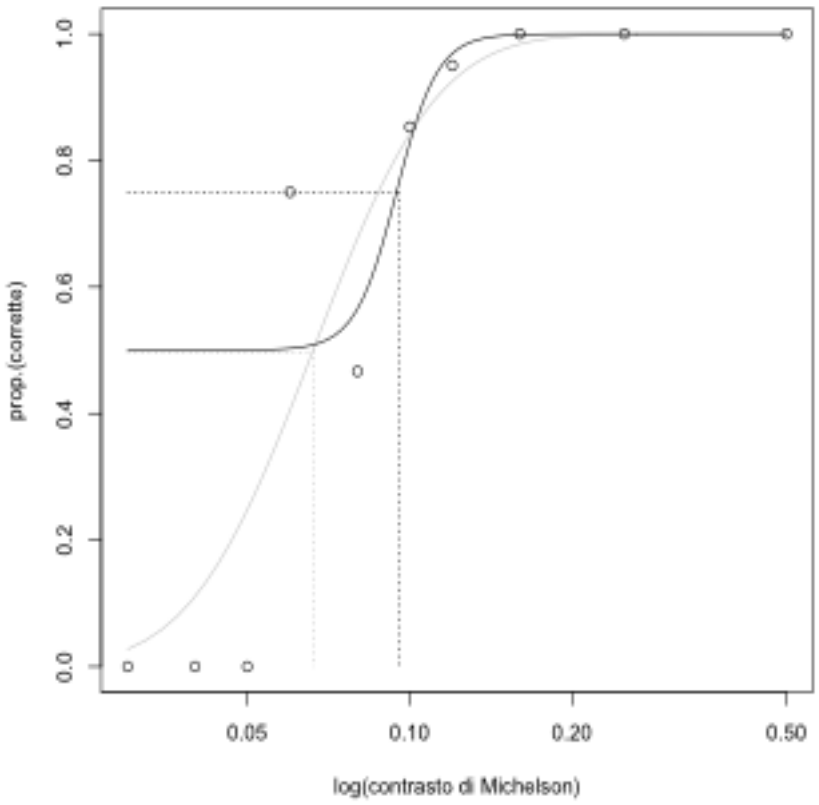

Figura 8. Proporzioni di risposte corrette in funzione del contrasto (cerchi vuoti) per le due staircase in Figura 8. La sigmoide grigia è il fit di una probabilità normale cumulativa, e la linea punteggiata grigia identifica il valore sull'asse x corrispondente a p = 0.5. La sigmoide nera è il fit di una funzione logistica cumulativa con la probabilità che va da p = 0.5 (risposta a caso) a p = 1. La linea punteggiata nera identifica il punto sulla curva che corrisponde alla soglia trovata con il metodo della staircase.

Il valore di soglia stimato in base al metodo descritto nella sezione 3 è sostanzialmente più basso di quello trovato con il metodo della staircase. Per rendere conto della discrepanza, notiamo che, a differenza della situazione descritta nella sezione 3, i dati non sono proporzioni di risposte(visto) ma proporzioni di risposte corrette in un compito a due alternative. In questo

compito, ci aspettiamo che la proporzione più bassa non si collochi attorno a p = 0 (il partecipante non risponde mai "visto"), ma a p = 0.5 (il partecipante risponde a caso; in un compito a tre alternative, questa proporzione scenderebbe a 1/3; con quattro alternative, a 1/4 , e così via). In questo modello dei dati, le proporzioni osservate p = 0 ai livelli più bassi di contrasto sono dovute all'errore casuale e al fatto che queste sono basate su pochissime prove (a causa della procedura di staircase). Con opportune modifiche alla procedura di fitting, è possibile stimare i parametri di una funzione sigmoide che va da p = 0.5 a p = 1 (curva nera nella figura). Il valore di questa funzione in corrispondenza della soglia trovata con il metodo della staircase (linea punteggiata nera) è quasi esattamente uguale alla soglia stimata con il metodo della staircase, a conferma che questo modello è quello che descrive adeguatamente i risultati dell'esperimento.

11. I metodi di Stevens

I metodi sviluppati da Stevens, diversi da quelli fechneriani, vengono chiamati metodi di psicofisica diretta perché assumono che i partecipanti siano in grado di valutare direttamente l'intensità percepita attribuendovi un numero. Nel metodo della *stima di magnitudine* (spesso anche chiamato stima di grandezza) viene presentato uno standard a cui è associato un numero arbitrario. Il compito dei partecipanti è assegnare altri numeri ai confronti via via presentati, usando l'intensità dello standard come riferimento (se lo standard è 100 e il confronto sembra essere due volte più intenso, diranno 200; se la metà, 50; e così via). Nel metodo del *confronto crossmodale,* i partecipanti non riportano numeri ma regolano l'intensità di uno stimolo in un canale sensoriale di riferimento per indicare quanto gli appare intenso lo stimolo che si vuole misurare. Ad esempio, per indicare quanto appare intenso un flash di luce, potremmo chiedere al partecipante di regolare l'intensità di un suono. Stevens mostrò che le persone mostrano un eccellente grado di accordo nelle loro risposte quando devono fare questi compiti, e riteneva che questo testimoniasse della loro validità. Stevens ha

fatto uso di questi metodi nei sui lavori sulla funzione potenza (Figura 2), mentre non ha esplorato, almeno per quanto ne so io, l'utilizzo dei metodi diretti per stimare punti di eguaglianza soggettivi e senisbilità.

12. La teoria della detezione del segnale

Nei metodi psicofisici di derivazione fechneriana, la sensibilità viene misurata come inverso della soglia. Le soglie, come abbiamo visto, sono a loro volta misurate utilizzando procedure sperimentali di detezione o di discriminazione, assumendo che le risposte dei partecipanti in questi compiti dipendano appunto dalla sensibilità e solo da quella. Nella Teoria della Detezione del Segnale (*Signal Detection Theory,* SDT, Swets, 1964), questa assunzione viene rifiutata in favore di un modello più realistico dei compiti psicofisici. In questo modello, la capacità di detezione o discriminazione non dipende dalla sola sensiblità sensoriale, ma anche dal *criterio di risposta* adottato dal partecipante. La SDT dunque propone che le risposte in un compito di detezione siano il risultato di due processi psicologici: un primo processo di elaborazione sensoriale, caratterizzato da maggiore o minore sensibilità, e un processo post-percettivo di decisione che dipende dalla propensione al rischio.

Per misurare entrambi, la SDT utilizza compiti in cui vengono somministrati due tipi diversi di prova: *segnale + rumore* oppure solo *rumore.* Per segnale intendiamo qualsiasi caratteristica dello stimolo ; per rumore intendiamo invece una situazione in cui il segnale non è presente e dunque la risposta sensoriale dipende solo dall'errore casuale implicito nel sistema (ad esempio, la frequenza spontanea di scarica dei neuroni, o fattori fisici o chimici che producono alterazioni nella trasmissione nervosa). Il rumore è sempre presente, mentre il segnale può non esserlo. Questa idea può venire applicata anche a situazione con più tipi di segnale, ossia situazioni in cui la risposta prevede una classificazione a più alternative. Tuttavia, un caso molto frequente è quello in cui il partecipante svolge un compito di detezione su una sola caratteristica. Ad esempio, potremmo immaginare un

esperimento in cui viene presentata un figura a basso contrasto (segnale più rumore), oppure un campo grigio con luminanza pari alla luminanza media della figura (rumore). Il partecipante deve rispondere “si” quando ritiene che sia stata presentata la figura, e “no” quando ritiene che sia stato presentato il campo omogeneo. Questa situazione è profondamente diversa da un compito di detezione classico, perché la risposta può avere quattro esiti a seconda del tipo di prova.

	S+N	N
si	H	FA
no	M	CR

Tabella 1. I possibili esiti di una risposta in un compito di detezione del segnale. In colonna, i due tipi di prova: segnale + rumore (S+N, *signal + noise)* o rumore (N). In riga, le possibili risposte. Nelle celle, il tipo di esito: hit (H), miss (M), false alarm (FA) o correct rejection (CR).

Gli esiti possibili di una prova in un compito di detezione del segnale del tipo si - no sono presentati nella Tabella 1. Nelle prove segnale + rumore, la risposta corretta viene chiamata *hit* (centro: il partecipante rileva correttamente la presenza del segnale). La risposta sbagliata viene invece chiamata *miss (*bersaglio mancato: il partecipante “si fa sfuggire” il segnale). Nelle prove con il solo rumore, la risposta corretta viene chiamata *correct rejection* (rifiuto corretto: il partecipante rileva correttamente la mancanza del segnale). La risposta sbagliata viene chiamata *false alarm* (falso allarme: il partecipante ritiene che il segnale fosse presente ma non era così). La proporzione di hit e di miss somma ad 1, perchè queste due proporzioni sono basate sul totale delle prove S+N. Allo stesso modo, la proporzione di false alarm e di correct rejection deve anch’essa sommare ad 1. Per caratterizzare la prestazione è quindi sufficiente una sola delle due proporzioni in ognuna delle due colonne, e tradizionalmente nella SDT si fa

uso delle proporzioni *H* e *FA.* L'idea fondamentale è questa: un osservatore che ha buona sensibilità riesce a fare, in proporzione, molti hit e pochi falsi allarmi; se fa tanti hit ma anche tanti falsi allarmi, è semplicemente un osservatore che ama il rischio e quindi risponde si anche quando non è ben sicuro di cosa ha visto.

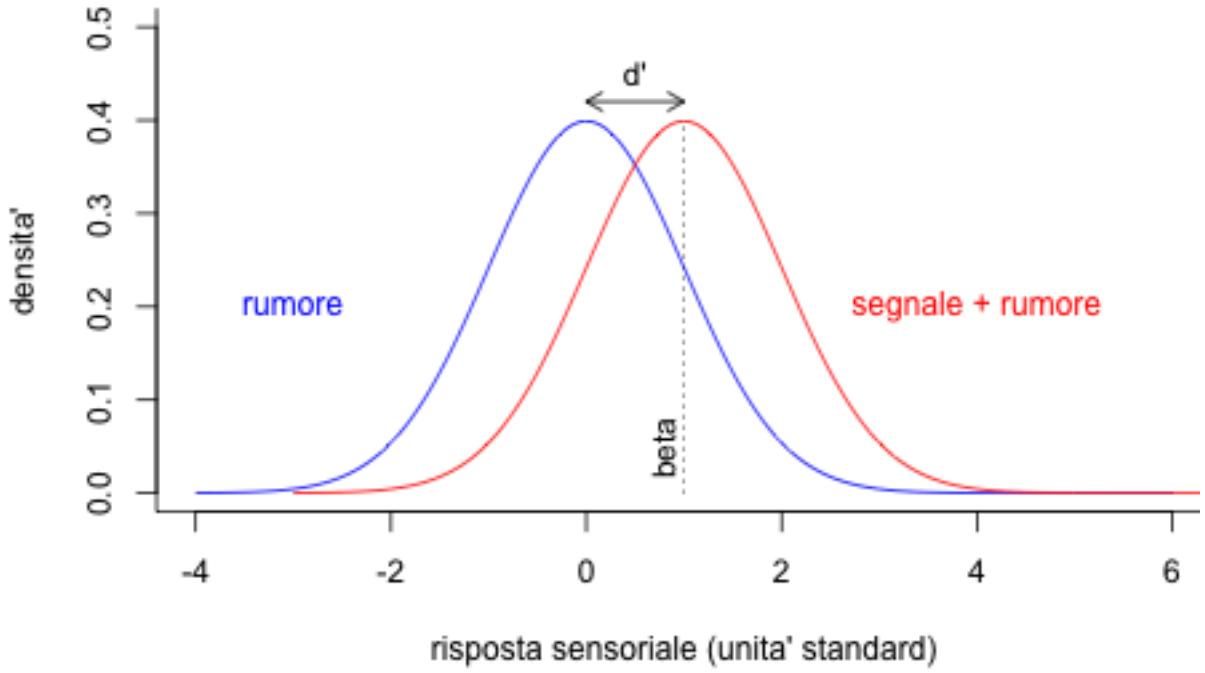

Figura 9. Modello di un compito di detezione secondo la Teoria della Detezione del Segnale. In assenza del segnale, la risposta sensoriale si riduce al rumore interno al sistema che si assume avere una distribuzione gaussiana la cui media, in unità standard, è pari a zero (blu). L'aggiunta di un segnale ha l'effetto di aumentare la risposta, spostando la distribuzione verso destra di una quantità pari alla sensibilità al segnale (d'), senza alterarne la dispersione (rosso). Per emettere la risposta, l'osservatore stabilisce un livello di risposta sensoriale al di sopra del quale emettere la risposta "visto" (beta). L'area a destra di beta nella distribuzione rossa è la probabilità di una detezione corretta (H: l'osservatore risponde "visto" quando il segnale è effettivamente presente). L'area a destra di beta nella distribuzione blu è la probabilità di un falso allarme (FA: l'osservatore risponde "visto" ma il segnale non era presente). Se manteniamo fisso d', abbassando beta p(H) aumenta ma aumenta anche p(FA); alzando beta, p(FA) si riduce ma si riduce anche p(H). Se manteniamo fisso beta, invece, p(FA) resta fisso ma p(H) aumenta o diminuisce a seconda che d' sia aumentato o diminuito.

La misura della sensibilità viene indicata, nella SDT, con il simbolo *d'* (*d-prime).* Come già accennato, la SDT assume che nel sistema

sia sempre presente del rumore. Anche in assenza del segnale, pertanto, verrà registrata una certa quota di risposte sensoriali, la cui distribuzione di probabilità può essere rappresentata come una distribuzione di errore casuale centrata sullo zero e con una certa dispersione. L'aggiunta del segnale nelle prove S+N ha l'effetto di spostare la media della distribuzione delle risposte sensoriali verso l'alto, di una quantità pari a *d'.* Per decidere quale risposta emettere, l'osservatore stabilisce un criterio-soglia di risposta sensoriale al di sopra del quale emetterà la risposta "si". La proporzione di risposte sensoriali al di sopra di questa soglia, nella distribuzione del rumore, definisce p(*FA*), la probabilità teorica di un false alarm; mentre la proporzione al di sopra della soglia nella distribuzione segnale + rumore definisce p(*H*) la probabilità teorica di un hit. In un esperimento di detezione del segnale, queste probabilità possono essere stimate utilizzando le probabilità empiriche di *FA* e *H.* Utilizzando queste stime, è possibile calcolare di quanto il segnale ha spostato verso l'alto la distribuzione S+N e quindi *d'* e il criterio utilizzato, che viene chiamato *beta.*

Le modalità per il calcolo dipendono dal modello statistico adottato. Il modello più semplice, usato molto spesso, è il *modello Gaussiano con uguali varianze.* In questo modello, la risposta sensoriale ha una distribuzione normale e le distribuzioni N e S+N hanno la stessa forma, cioè hanno la stessa varianza. I dettagli di questo modello sono presentati nella Figura 9. Il criterio dell'osservatore, beta, taglia le due distribuzioni in un qualche punto definendo due aree: l'area a destra di beta nella distribuzione N, che corrisponde a p(*FA*), e l'area a destra di beta nella distribuzione S+N, che corrisponde a p(*H*). Conoscendo queste due aree, è sufficiente trovare i quantili corrispondenti (punti z) e sottrarre il primo dal secondo per trovare la distanza che separa le due distribuzioni. Questa distanza è *d'.* Pertanto

$$d' = \mathrm{z}(H) - \mathrm{z}(FA)$$

dove H e FA sono le proporzioni, osservate empiricamente, di hit e false alarm in un compito di detezione del segnale. Per la misura del criterio si può invece notare che la scelta del criterio di risposta equivale a decidere sopra quale livello del rapporto segnale/rumore va emessa la riposta. Questo rapporto è rappresentato, nel modello considerato, dal rapporto fra due lunghezze:

$$beta = \mathrm{d}(\mathrm{z}(H)) \,/\, \mathrm{d}(\mathrm{z}(FA))$$

dove d(*H) e* d(*FA)* rappresentano, rispettivamente, la densità di probabilità (altezza della curva) in corrispondenza dei quantili z(H) e z(FA), nelle curve relative alle prove S+N e N.

In situazioni più complesse, la SDT prevede la possibilità di calcolare le due statistiche anche quando vi è motivo di ritenere che le distribuzioni N e S+N abbiano forma diversa (*modello Gaussiano con diverse varianze)*, o che siano descritte da distribuzioni di probabiilità diverse dalla normale. Inoltre, come già detto, è possibile applicare la SDT anche a compiti in cui le categorie di risposta siano più di due. Infine, la SDT può essere utiizzata per misurare la sensibilità in compiti diversi dal compito di detezione descritto in questa dispensa. Ad esempio, nel compito "uguale - diverso", vengono presentate coppie di stimoli che possono essere uguali
o diversi. Il compito consiste nel categorizzare ogni coppia come appunto uguale o diversa. Nel compito ABX, vengono presentati due stimoli diversi A e B, seguiti da un terzo stimolo X che può essere uguale ad A o B. Il compito dell'osservatore consiste nel decidere se X è uguale ad A o a B. Nel compito "trova il diverso" (*oddity task),* vengono presentati tre stimoli in ordine casuale e il compito consiste nell'identificare quello diverso dagli altri due. Questi compiti sono utilizzati spesso in psicologia cognitiva con stimoli soprasoglia, misurando il tempo di reazione per valutare la prestazione in funzione di diverse manipolazioni sperimentali. La SDT fornisce un approccio

alternativo, che consente di aggiungere alle misure dei tempi anche una stima della sensibilità. Tutte queste tecniche richiedono l'utiizzo di tecniche statistiche avanzate, che vanno al di là di questa introduzione elementare alla psicofisica (ma vedi il package *psyphy* di R).

13. Glossario [più eventuali risorse internet]

beta: criterio di risposta nella SDT; valore-soglia della variabile interna con cui l'osservatore emette la risposta; cirterio al di sopra del quale l'osservatore decide di emettere la risposta "si" in un compito di detezione del segnale; misurabile con il rapporto fra le densità di probabilità (altezza della curva) in corrispondenza di z(HIT) e di z(FA), rispetto alle rispettive distribuzioni

Bitebar: "barra da mordere", apparato per la stabilizzazione ottimale della testa in psicofisica della visione; prima dell'esperimento, viene fatto un calco della dentatura dell'osservatore, il calco viene montato tenendeo conto della posizione desiderata della testa e l'osservatore lo tiene fra i denti durante le misurazioni

Canale: detto anche canale psicofisico, meccanismo neurale ipotetico che funziona come un filtro rispetto ad un continuum di stimolazione fisica; il canale è sintonizzato su una gamma ristretta dei valori fisici, elaborando solo quelli; esempi sono i canali per le frequenze spaziali o per l'orientazione dei contorni

Chinrest: "poggia mento" o mentoniera; apparato per la stabilizzazione della testa durante esperimenti di psicofisica visiva; l'osservatore posa il mento e la fronte su supporti appositamente posizionati; talvolta usato in combinazione con ulteriori cuscinetti per le guance; utilizzato in esperimenti che non richiedono la stabilizzazione quasi perfetta che si ottiene con un bitebar

Contrasto di Michelson: misura del cambiamento relativo nella luminanza di in un campo bipartito (ad esempio, in una configurazione disco-anello o in un reticolo); il contrasto di Michelson è il rapporto $(L_{max} - L_{min})/ (L_{max} + L_{min})$.

d': *d-prime,* nella SDT è l'indice di discriminabilità, misura della sensibilità indipendente dal criterio; calcolabile con la differenza fra z(HIT) e z(FA)

Funzione psicometrica: funzione che descrive come la probabilità di

rilevazione (detezione) o di discriminazione vari al variare dell'intensità fisica dello stimolo; tipicamente visualizzata da una curva approssimativamente sigmoide; utilizzata per stimare la soglia assoluta, o la jnd e il punto di eguaglianza soggettivo, a partire da misure psicofisiche

Intensità: la misura fisica della grandezza di uno stimolo fisico, misurata con un opportuno strumento; indicata solitamente con la lettera I

Isteresi: tendenza a continuare ad emettere la stessa risposta dopo una serie di risposte sempre uguali; si manifesta, ad esempio, nel metodo dei limiti con una asimmetria fra serie ascendenti e discendenti

JND: *just-noticeable difference,* differenza appena percepibile; unità di misura psicologica per l'intensità percepita; un percetto a 2 JND corrisponde a uno stimolo fisico due soglie differenziali sopra la soglia assoluta

Leggi psicofisiche: dette anche funzioni psicofisiche, sono generalizzazioni empiriche che descrivono, in maniera quantitativa, relazioni fra grandezze percepite e grandezze fisiche; esempi sono la legge di Weber e la funzione psicofisica di Stevens; un esempio più complesso è la funzione di sensibilità al contrasto

Legge di Stevens: principio generale secondo cui la risposta psicologica *S* a uno stimolo di intensità *I* è una funzione potenza della forma $S = I^a$, dove *a* è un esponente caratteristico del tipo di stimolazione

Legge di Weber: principio generale secondo cui la sensibilità non è costante ma inversamente proporzionale all'intensità dello stimolo; espressa solitamente dalla formula $\Delta I / I = k$ (la soglia differenziale è costante in rapporto alla intensità fisica dello stimolo)
[http://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Weber-Fechner]

Psicofisica: lo studio con metodi comportamentali delle relazioni quantitative fra le esperienze percettive coscienti (percetti) e le proprietà fisiche dell'ambiente (stimoli)

Reticoli: stimoli utilizzati per misurare per via psicofisica la sensibilità al contrasto e la detezione di discontinuità di luminanza orientate nello spazio (i "contorni")

Reticoli sinusoidali: reticoli in cui la luminanza varia in una sola direzione dello spazio secondo una funzione seno; ; sono definiti da quattro parametri: la frequenza spaziale, il contrasto, la fase e l'orientazione

[http://www.psy.vanderbilt.edu/courses/hon185/SpatialFrequency/SpatialFrequency.html]

Reticoli di Gabor: detti anche *Gabor patch,* sono reticoli sinusoidali in cui la luminanza di ogni punto viene pesata con una normale bivariata che ha il picco al centro del reticolo; il risultato è che oltre a variare in una direzione secondo una funzione seno i reticoli di Gabor diventano anche sempre meno intensi quanto più ci si allontana dal centro; l'effetto percettivo è un reticolo sinusoidale intenso al centro e sfumato in periferia, senza un margine netto che ne marca il confine [http://www.cogsci.nl/software/online-gabor-patch-generator]

SDT: *Signal Detection Theory,* teoria della detezione del segnale; metodo per misurare la sensibilità a partire dalle proporzioni di *hit* e di *false alarm* in un compito in cui l'osservatore deve distinguere fra prove in cui è presente un segnale e prove in cui è presente solo rumore [http://wise.cgu.edu/sdtmod/index.asp]

Sensibilità: l'efficienza con cui un particolare canale è in grado di rilevare un segnale sensoriale; inverso della soglia sensoriale (1/soglia, quindi soglia alta implica bassa sensibilità, soglia bassa implica alta sensibilità)

Soglia assoluta: il minimo valore di intensità fisica di uno stimolo che un osservatore riesce a rilevare (fissate determinate condizioni) [http://it.wikipedia.org/wiki/Soglia_percettiva]

Soglia differenziale: la minima differenza nell'intensità fisica di due stimoli che un osservatore riesce a rilevare (fissate determinate condizioni)

ms: millisecondi, millesimi di secondi, unità di misura tipicamente usata per la durata di stimoli psicofisici

nm: nanometri (prima dell'adozione del Sistema Internazionale di unità di misura erano denominati millimicron e indicati con il simbolo mμ), unità di misura per distanze su scala atomica o molecolare, ad esempio in spettroscopia

14. Bibliografia

Knoblauch, K. & Maloney, L. T. (2012). *Modeling Psychophysical Data in R.* Springer, UserR! Series.

Pirenne, M. H. (1967). *Vision and the eye. 2nd Edition.* Chapman and Hall

Ltd.

Stevens, S.S. (1951). *Handbook of experimental psychology.* Wiley & sons.

Swets, J. A. (1964). *Signal Detection and Recognition by Human Observers.* John Wiley & sons.

Yssaad-Fesselier, R. and Knoblauch, K. (2006) Modeling psychometric functions in R. *Behavior Reseaarch Methos, Instruments, and Computers*, 38(1), 28–41.

Velleman, P. (1997). *DataDesk Statistics Guide.* Data Description inc.

Venables, W.N., Smith, D.M., and the R Core Team (2012). *An introduction to R, Version 2.15.2*. R Core Team, http://R.com.

Wolfe, J., et al. (2007). *Sensazione e percezione.* Zanichelli.