

Reazione pre-stimolo della frequenza cardiaca: repliche e controlli

Antonella Vannini e Ulisse Di Corpo

Abstract

L'esperimento sull'effetto di anticipazione prestimolo della frequenza cardiaca, riportato in un precedente articolo (Vannini e Di Corpo, 2007), è stato ripetuto 3 volte inserendo controlli sullo strumento, al fine di verificare l'effettiva sincronizzazione delle misure del cardiofrequenzimetro con le immagini presentate a monitor, sul disegno sperimentale, con l'aggiunta di trial senza feedback, sull'ordine di presentazione degli stimoli e sulle analisi statistiche.

Tutti gli esperimenti hanno finora confermato l'effetto di anticipazione della frequenza cardiaca, specificandone alcune caratteristiche, ad esempio l'effetto è tanto più forte quanto più lo stimolo è vicino al feedback del computer, è del tutto assente quando il computer, pur operando la scelta non presenta il feedback a monitor; quest'ultimo controllo è stato ripetuto più volte e porta ad escludere l'esistenza di cause a monte che possano intervenire nella spiegazione dell'effetto osservato.

1. L'esperimento di Tressoldi e collaboratori

Nell'articolo "*Heart Rate Differences between Targets and Nontargets in Intuitive Tasks*" Tressoldi e collaboratori (2005) effettuano un primo esperimento esplorativo e un secondo esperimento confermativo, verificando (con significatività statistica $p=0,015$ nel primo caso e $p=0,001$ nel secondo caso) l'ipotesi che la frequenza del battito cardiaco possa reagire allo stimolo prima che lo stimolo stesso venga determinato.

Esperimento 1

Il primo esperimento ha coinvolto 12 soggetti, 5 maschi e 7 femmine con età media di 25,5 anni (range di età 24-45 anni), principalmente studenti universitari. Questi soggetti sono stati invitati a partecipare ad una prova computerizzata che si basava sulla capacità di indovinare. I partecipanti venivano fatti sedere su una sedia comoda davanti ad un monitor di computer e veniva applicato loro, sull'indice della mano sinistra, un rilevatore della frequenza cardiaca. I soggetti erano informati del fatto che gli stimoli sarebbero stati scelti casualmente dal computer e che il loro compito era quello di indovinare, tramite l'intuizione, quale stimolo sarebbe apparso sul monitor. Ogni prova consisteva di tre fasi:

1. una prima fase di presentazione seriale di 4 immagini (fiori, ritratti, paesaggi, piante, animali, monumenti, ecc.) della durata di 10 secondi, durante la quale veniva rilevata la frequenza cardiaca;
2. una seconda fase di presentazione contemporanea, in un'unica schermata, delle 4 immagini in cui si chiedeva al soggetto di scegliere con il mouse l'immagine che sarebbe stata successivamente selezionata dal computer;
3. una terza fase in cui, dopo la scelta operata del soggetto, il computer selezionava l'immagine (*target*), in base alla generazione di un numero casuale dall'1 al 4; l'immagine così selezionata veniva poi presentata al partecipante.

Ad ogni prova le immagini cambiavano.

L'acquisizione dei dati sulla frequenza cardiaca ed il funzionamento del relativo apparato erano monitorati da un assistente posizionato alle spalle del partecipante. L'assistente non poteva avere alcuna informazione in merito all'immagine che sarebbe stata selezionata dal computer, in quanto la selezione veniva effettuata solo dopo la scelta espressa dal soggetto. Il ruolo dell'assistente era unicamente quello di supervisionare il dispositivo che consentiva l'acquisizione della frequenza cardiaca; nel caso si fossero riscontrate anomalie l'assistente avrebbe dovuto sospendere l'esperimento. Ogni soggetto è stato sottoposto a 20 prove, per

un totale di 80 figure diverse (4 per ogni prova).

L'analisi dei dati è stata effettuata sulle frequenze cardiache rilevate nella prima fase. Il confronto è stato operato tra frequenze cardiache rilevate durante la presentazione di figure *target* e di figure *non target*, dove:

- Le figure *target* sono quelle che il computer seleziona, nella fase 3, attraverso un processo random.
- Le figure *non target* sono invece quelle che non vengono selezionate dal computer.

I risultati di questo primo esperimento mostrano una differenza statisticamente significativa tra le frequenze cardiache associate ai target e le frequenze cardiache associate ai non target, con un livello di significatività statistica pari a $p=0,015$.

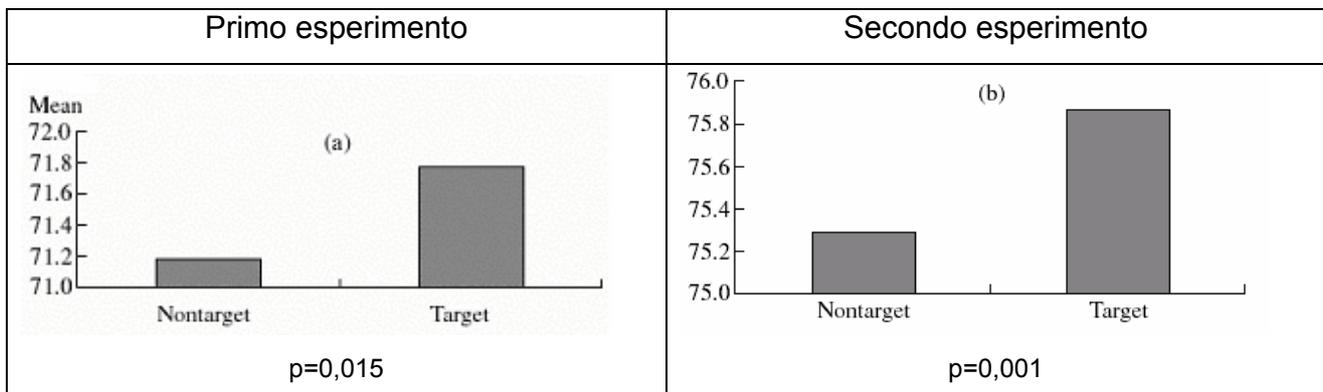
Prima di interpretare i risultati, tuttavia, gli autori hanno voluto replicare questo esperimento con altri 12 soggetti, al fine di escludere che le evidenze prodotte in questo primo esperimento potessero essere il prodotto di artefatti statistici.

Esperimento 2

Nel secondo esperimento furono coinvolti altri 12 soggetti, 5 maschi e 7 femmine, età media 25,3 (range di età 23-48 anni). Anche questo secondo esperimento, del tutto identico al primo per tipo di compito, procedure e tipo di stimoli, mostra una differenza statisticamente significativa nella frequenza cardiaca rilevata durante la presentazione di stimoli target e stimoli non target, ad un livello di probabilità pari a $p=0,001$.

Discussione dei due studi

Le figure a) e b) della tabella 1 illustrano il confronto tra i risultati per gli stimoli target e non target ottenuti nei due esperimenti.



Tab. 1 - Risultati ottenuti da Tressoldi e collaboratori nel confronto tra figure target e non target

I risultati ottenuti nel secondo esperimento replicano la differenza tra frequenze cardiache associate ai target e frequenze cardiache associate ai non target, osservate nel primo esperimento. Anche se ulteriori verifiche saranno necessarie, i risultati di questi esperimenti si pongono a supporto di una risposta “anticipatoria” prestimolo della frequenza cardiaca che Tressoldi descrive con il termine “intuizione”.

Tressoldi e collaboratori sottolineano nelle conclusioni che con questa semplice procedura si è potuto rilevare una sottile modificazione “anticipatoria” nella frequenza cardiaca, a seconda della natura dello stimolo (target o non target), nonostante la scelta cosciente dei soggetti sperimentali fosse casuale: infatti, in entrambi gli esperimenti, il numero di target correttamente indovinati corrispondeva alla quota determinabile in base al caso (5 target in media su un totale di 20 target). La probabilità che i dati osservati possano essere il frutto di artefatti statistici, anche se in teoria sempre possibile, può essere considerata bassa grazie alla concordanza tra i risultati del primo esperimento esplorativo e quelli del secondo esperimento confermativo e l’ulteriore conferma dei risultati in tutti i campioni di 12 soggetti ciascuno, ottenuti dalla combinazione a caso di 6 soggetti del primo esperimento e 6 del secondo esperimento. Nella discussione dei risultati, Tressoldi e collaboratori sostengono che gli effetti emersi dai due esperimenti sono sufficientemente attendibili da poter essere considerati come espressione di effetti reali.

2. Replica dell'esperimento di Tressoldi: preparazione degli esperimenti

I primi tentativi di replicazione dell'esperimento di Tressoldi sono iniziati nel mese di novembre 2007. L'ostacolo iniziale era relativo allo strumento per la rilevazione della frequenza cardiaca. Sono stati contattati tutti i produttori e rivenditori italiani di strumenti di laboratorio per la rilevazione dell'ECG e per il calcolo della frequenza cardiaca, ma in tutti i casi i prodotti erano corredati da software che non rispondeva alle esigenze di sincronizzazione tra la misura della frequenza cardiaca e la presentazione delle immagini a computer. Inoltre, i produttori di questi strumenti non erano disposti a fornire le chiavi per il dialogo e l'acquisizione dei dati tramite la porta seriale, impedendo di fatto lo sviluppo di software da parte di terzi. Gli strumenti di laboratorio rinvenuti sul mercato presentavano sempre questo limite: software preconfezionato e impossibilità di disporre delle chiavi per il dialogo diretto con lo strumento. Al fine di cercare di ovviare queste difficoltà, un laboratorio di ricerca del nord Italia ha inviato alcuni strumenti di laboratorio per la rilevazione dell'ECG, ma in tutti i casi si è osservata l'impossibilità di stabilire il dialogo tramite la porta seriale. Tutti gli strumenti richiedevano un codice, una password, per l'attivazione del dialogo attraverso la porta seriale che era nota solo al produttore dello strumento. Il produttore dello strumento, una volta contattato, si rifiutava di fornire la password, proponendo di realizzare lui il software necessario, proteggendosi così dalla eventualità che terzi producessero software indipendentemente sugli strumenti da loro venduti.

In merito è stato contattato il professore Tressoldi, il quale ha confermato la stessa difficoltà. Presso il dipartimento di psicologia generale di Padova il problema è stato risolto facendo costruire il cardiofrequenzimetro direttamente dal loro tecnico di laboratorio. In altre parole, gli esperimenti del prof. Tressoldi hanno utilizzato un cardiofrequenzimetro costruito ad hoc. Questa strada non era però percorribile presso la facoltà di psicologia di Roma.

A dicembre 2007 si è iniziato a valutare l'utilizzo di strumenti non di laboratorio. Si è perciò allargata progressivamente l'indagine, giungendo alla scoperta di cardiofrequenzimetri utilizzati nel training sportivo.

La quasi totalità degli strumenti analizzati presentavano però gravi problemi nell'associazione della misura con il momento di rilevazione della misura stessa, e ciò a causa di vari fattori. Ad esempio:

1. alcuni cardiofrequenzimetri memorizzano i dati su di un orologio da polso, utilizzando così un clock diverso da quello del computer con il quale viene condotto l'esperimento;
2. il dato registrato su file non viene corretto in base al ritardo dovuto alla misura;
3. forti imprecisioni intrinseche negli strumenti.

Dopo un'attenta ricognizione è stato scelto il sistema "home training" della SUUNTO (www.suunto.com), composto da una cintura toracica per la rilevazione della frequenza cardiaca e da una interfaccia USB (PC-POD) che riceve istantaneamente le misure effettuate dalla cintura toracica utilizzando segnali radio digitali e codificati che garantiscono l'assenza di interferenze.



*Tab. 2 - Cardiofrequenzimetro della SUUNTO
composto da cintura toracica e radio-ricevitore USB*

Il sistema SUUNTO memorizza su file la frequenza cardiaca associandovi l'informazione dell'ora esatta (anno, mese, giorno, ora, minuto, secondo). La misura è relativa al valore medio per il secondo indicato e viene memorizzata su file compensando i ritardi dovuti ai tempi necessari per realizzare la misura stessa e per elaborare l'informazione. Il dato risulta perciò perfettamente sincronizzato con il secondo indicato. Il dato della frequenza cardiaca salvato su file è espresso in unità, senza decimali.

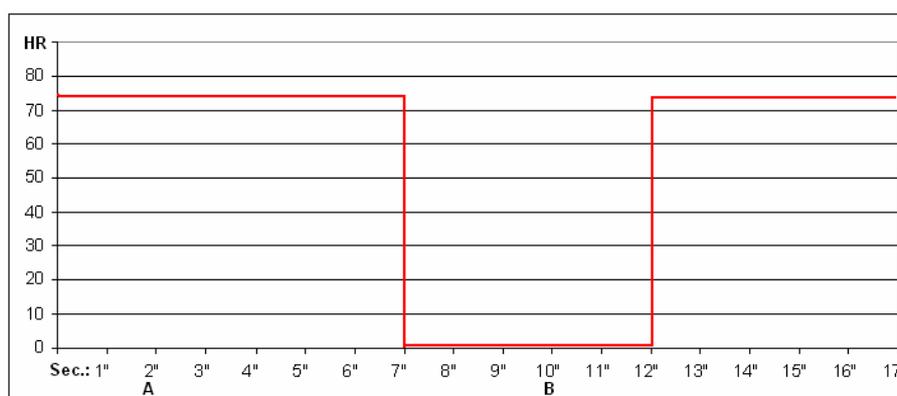
Il cardiofrequenzimetro della SUUNTO è stato progettato per il monitoraggio delle attività sportive e può essere utilizzato nelle condizioni più estreme, ad esempio anche sott'acqua. Non richiede l'uso di gel per la conduzione del segnale e il suo utilizzo risulta estremamente semplice. L'unico limite si è riscontrato nelle stagioni fredde, quando in un numero limitato di soggetti si è osservata l'impossibilità di rilevare la frequenza cardiaca. Questi soggetti sono stati esclusi dal campione per assenza di dati.

- *Comportamento del cardiofrequenzimetro della SUUNTO*

Prima di avviare gli esperimenti si è voluto controllare l'effettiva sincronizzazione delle misure prodotte dal cardiofrequenzimetro della SUUNTO con l'orario indicato dal clock del computer. Il dato della frequenza cardiaca viene visualizzato in tempo reale sul monitor del computer e salvato in un file:

1. *Sul monitor del computer.* In questa modalità si è osservato che (tab. 3):

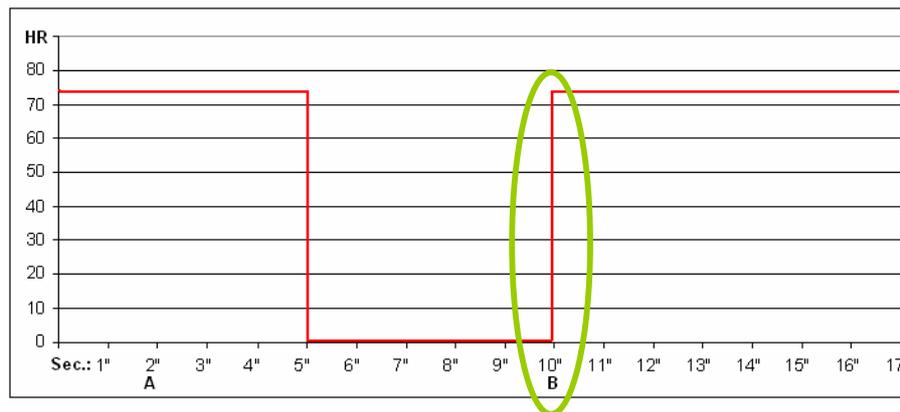
- A. quando il segnale viene disattivato (allontanando l'apparecchio dal torace, punto A) la misura scompare dopo 5 secondi;
- B. quando il segnale viene ripristinato (riportando l'apparecchio a contatto con il torace, punto B) la misura riprende dopo 2 secondi.



Tab. 3 - *Comportamento della misura presentata a monitor*

2. *Nel file dati.* In questa modalità si è osservato che (tab. 4):

- A. quando il segnale viene disattivato (allontanando l'apparecchio dal torace, punto A) l'ultima misura viene mantenuta per 3 secondi;
- B. quando il segnale viene ripristinato (riportando l'apparecchio a contatto con il torace, punto B) **la misura riprende istantaneamente.**



Tab. 4 - Comportamento della misura registrata su file

Questo controllo mostra che mentre il ritardo della misura presentata in “tempo reale” su monitor è di circa 2 secondi, nel file dati il ritardo viene compensato e il dato è associato al momento esatto della misura (punto B della tab. 4 evidenziato in verde).

Nel file dati il valore della frequenza cardiaca è associato alla data del clock del computer (anno, mese, giorno, ora, minuto, secondo). I controlli effettuati hanno inoltre mostrato che la misura riportata su file si riferisce al secondo in corso. In altre parole, una misura associata alle 14.13'.25" è stata calcolata considerando il secondo che inizia alle 14.13'.25".000. Nelle analisi dei dati sono stati effettuati una serie di controlli facendo slittare le misure della frequenza cardiaca di uno o più secondi indietro o avanti nella sequenza temporale. Si è osservato che lo sfasamento di un solo secondo, negli esperimenti in cui lo stimolo veniva presentato per soli 2 secondi, portava all'annullamento di tutte le significatività statistiche. In altre parole, la perfetta sincronizzazione tra la misura della frequenza cardiaca e la presentazione dell'immagine su monitor è la condizione fondamentale affinché si possa osservare l'effetto.

- Scelta degli stimoli

La procedura messa a punto da Tressoldi è composta da tre fasi:

1. in cui vengono presentate in successione 4 immagini a tutto schermo e durante la quale viene rilevata la frequenza cardiaca;
2. in cui le 4 immagini precedentemente presentate vengono mostrate assieme e si chiede al soggetto di operare una scelta, cioè di cercare di indovinare l'immagine scelta successivamente dal computer;
3. in cui il computer sceglie, utilizzando una procedura random, una delle 4 immagini (target) presentate nella fase 1 e la mostra a monitor a tutto schermo (feedback).

Inizialmente l'esperimento è stato realizzato utilizzando il linguaggio di programmazione Visual Basic 2005, successivamente si è passati a Delphi Pascal. Delphi Pascal consente infatti un maggiore controllo delle singole istruzioni. E' stata dedicata particolare attenzione alla sincronizzazione tra la presentazione delle immagini al computer e il clock del computer.

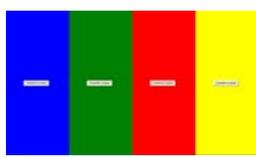
L'ipotesi dell'esperimento è che nel caso di reazione anticipata della frequenza cardiaca si dovrebbe osservare, nella fase di presentazione degli stimoli, una differenza tra le frequenze cardiache rilevate durante la presentazione di stimoli target (quelli che vengono successivamente selezionati dal computer) e di stimoli non target (cioè quelli che non vengono successivamente selezionati dal computer).

I primi test dell'esperimento utilizzavano stimoli composti da rette di colore nero collocate orizzontalmente, verticalmente e diagonalmente su di uno sfondo bianco. L'analisi dei dati non mostrava però alcuna differenza statisticamente significativa tra stimoli target e stimoli non target.

Si è tornati perciò al modello che nasce dalla teoria della sintropia di Fantappiè. Il punto centrale di questo modello è che l'anticipazione dovrebbe essere mediata dalle *emozioni* e, di conseguenza, al fine di testare l'ipotesi sperimentale, è necessario utilizzare stimoli che

suscitano emozioni. Seguendo questa indicazione si è deciso di utilizzare come stimoli i 4 colori elementari: blu, verde, rosso e giallo. Utilizzando questi stimoli, si è osservata subito una forte differenza tra le frequenze cardiache associate a stimoli target e non target all'interno degli stessi colori, mentre a livello globale (cioè considerando l'effetto sui quattro colori presi assieme) non si osservava alcuna differenza.

Si è quindi deciso di realizzare gli esperimenti utilizzando i 4 colori elementari come stimoli. Inizialmente gli esperimenti presentavano gli stimoli della fase 1 per 4 secondi ciascuno. La frequenza cardiaca veniva rilevata ogni secondo e in questo modo, ad ogni stimolo, erano associate 4 misure della frequenza cardiaca. Nel secondo esperimento la presentazione degli stimoli della fase 1 è stata ridotta ad una durata di 2 secondi ciascuno. Ciò ha consentito di testare il comportamento del cardiografometro e di effettuare una serie di prove e di controlli in merito all'effettiva possibilità di sincronizzare la presentazione degli stimoli con la misura della frequenza cardiaca.

FASE 1				FASE 2	FASE 3
<i>Presentazione delle immagini e misurazione della frequenza cardiaca</i>				<i>Scelta</i> 	<i>Selezione Random</i> 
Immagine 1	Immagine 2	Immagine 3	Immagine 4		
<i>4 secondi</i>	<i>4 secondi</i>	<i>4 secondi</i>	<i>4 secondi</i>		

Tab. 5 - Fasi di un trial sperimentale:

1. i colori vengono presentati in successione a tutto schermo per 4 secondi esatti ciascuno e la frequenza cardiaca rilevata ad intervalli di 1 secondo;
2. il soggetto sceglie un colore cercando di indovinare quello che sarà selezionato dal computer;
3. il computer seleziona tramite un procedimento random uno dei 4 colori e lo presenta a tutto schermo.

E' importante sottolineare che durante la conduzione dell'esperimento sono attivi due software:

1. realizzato dalla SUUNTO, per la rilevazione della frequenza cardiaca. Questo programma abbina ad ogni frequenza cardiaca il momento della rilevazione, cioè l'indicazione dell'anno, del mese, del giorno, dell'ora, del minuto e del secondo. Questi dati vengono memorizzati in un file e in una directory creati indipendentemente dal software della SUUNTO.
2. realizzato in Delphi Pascal, per la presentazione degli stimoli e per la conduzione dell'esperimento. Gli stimoli vengono presentati esattamente allo scoccare del secondo, con la precisione del millisecondo, ottenendo in questo modo una sincronizzazione, praticamente perfetta, tra il dato rilevato dal cardiofrequenzimetro e lo stimolo presentato dal computer. Questo programma memorizza in una directory e in un file diverso da quello creato dal programma della SUUNTO le informazioni relative allo stimolo, alla sua presentazione, alla fase sperimentale, alla scelta del soggetto e del computer. Queste informazioni sono sempre abbinate al momento esatto dell'evento: anno, mese, giorno, ora, minuto, secondo e millisecondo.

Solo alla fine dell'esperimento i due file vengono uniti assieme utilizzando quale elemento comune il momento (la data, l'ora, il minuto ed il secondo) in cui è stato presentato lo stimolo ed in cui è stata rilevata la frequenza cardiaca. In questo file vengono aggiunte, per ogni stimolo, le informazioni relative al fatto se si tratta di uno stimolo target (successivamente scelto dal computer) o di uno stimolo non target (che successivamente, nella fase 3, non viene scelto dal computer).

- Impredicibilità delle distribuzioni casuali

Al fine di testare l'ipotesi di effetti anticipatori la condizione fondamentale è quella di disporre di sequenze imprevedibili, cioè sequenze casuali.

In una sequenza casuale ogni termine della sequenza è totalmente indipendente dai termini precedenti e dai termini successivi. In altre parole, non esiste alcuna logica, alcuna informazione che lega termini collocati in posizioni diverse della sequenza. Questa condizione è nota come *indipendenza sequenziale* delle sequenze casuali ed è a volte descritta come “mancanza di memoria”: il processo di estrazione casuale “non ricorda” i termini precedentemente selezionati e non può basare su di essi le selezioni di quelli successivi.

L'indipendenza sequenziale implica le seguenti qualità:

1. *L'imprevedibilità*. La conoscenza di qualsiasi porzione della sequenza casuale non fornisce alcuna informazione utile per inferire qualunque altra porzione e/o per inferire le possibili estrazioni future. In altre parole, la conoscenza dei primi k termini non dà alcuna base di giudizio per sapere il termine $k+1$: questa proprietà è chiamata imprevedibilità.
2. *L'equiprobabilità*. Una sequenza è casuale se in ogni punto ogni termine ha la stessa probabilità di essere estratto (*equiprobabilità*). Nel caso del lancio di un comune dado, tutte e sei le facce, per ogni lancio, hanno uguale probabilità di uscita. Similmente, si ha la stessa situazione con una moneta: per ogni lancio può uscire, indipendentemente, sia “testa” che “croce”. L'equiprobabilità implica l'indipendenza sequenziale in quanto richiede che la scelta di ogni termine sia indipendente dalla scelta dei termini precedenti, cosicché ogni termine ha la stessa probabilità di essere scelto. Una conseguenza dell'equiprobabilità sono le distribuzioni di frequenza piatte, cioè ogni termine, nel tempo, mostrerà valori di frequenza analoghi agli altri termini.
3. *L'irregolarità*. L'imprevedibilità porta una *sequenza casuale* a manifestare successioni “irregolari” e “non ripetitive” dei termini che la compongono.
4. *Assenza di ordine*. Le sequenze casuali risultano totalmente prive di *struttura* e di ordine. I processi cognitivi cercano, generalmente, di “strutturare”, di ordinare le informazioni al fine di facilitare i processi di codifica e di ritenzione dell'informazione. Le sequenze casuali non offrono tale possibilità.

La differenza fondamentale tra causalità e casualità può essere ricondotta al fatto che mentre nella *causalità* si ha una base per la previsione degli eventi, per la *casualità* gli eventi non si

possono predire. Di conseguenza, una sequenza casuale si definisce anche come una successione di termini (eventi) che nessun processo cognitivo potrà mai essere in grado di predire.

- *Pseudorandom e random*

Con l'introduzione dei computer si è diffuso l'uso del termine inglese *random* al posto del termine italiano *casuale*. Nei vari linguaggi di programmazione le procedure di estrazione di numeri e di sequenze casuali utilizzano, in genere, il termine *random*.

Per facilità di esposizione, nella presente trattazione si farà riferimento in modo specifico alle caratteristiche del linguaggio di programmazione Delphi-Pascal che è stato utilizzato in questo lavoro per realizzare le applicazioni software degli esperimenti di anticipazione.

Il linguaggio Delphi-Pascal utilizza una sequenza *random* predefinita (di lunghezza 2^{32}) alla quale si accede utilizzando un puntatore che può essere definito dall'utente o scelto sul momento dal computer utilizzando il valore numerico estratto dal clock, dall'orologio interno del computer.

Il linguaggio Delphi-Pascal presenta varie istruzioni, tra cui:

- *Randomize* che legge l'orologio interno al computer e utilizza il valore estratto come puntatore alla sequenza *random* predefinita;
- *Random* che legge il valore numerico della sequenza *random* al quale sta puntando il puntatore.

All'utente viene anche data la possibilità di inserire un valore da lui scelto per puntare alla sequenza *random*, questa opzione viene in genere utilizzata nei programmi in cui vi è

esigenza di criptare le informazioni. Infatti, utilizzando lo stesso puntatore, l'estrazione dei numeri casuali sarà sempre la stessa.

Vediamo ora di capire come mai le sequenze prodotte dai computer vengono chiamate pseudorandom.

Come si è visto, al fine di ottenere sequenze casuali diverse si utilizza la procedura *Randomize*; questa procedura legge il clock del computer per estrarre un valore imprevedibile attraverso il quale puntare alla sequenza casuale. Il problema sorge nel momento in cui la procedura *Randomize* viene richiamata più volte. Poiché ogni ciclo di elaborazione dati impiega sempre lo stesso tempo il nuovo valore del clock estratto dalla procedura *Randomize* sarà, in pratica, determinato da quello precedente. In altre parole le estrazioni, seppure effettuate su di una sequenza casuale, vengono tutte determinate dal primo valore estratto: il primo valore determina il successivo, e così via, facendo venir meno la condizione dell'indipendenza sequenziale della distribuzione casuale.

In genere il fatto che le sequenze generate dai computer siano degli pseudorandom viene considerato di secondaria importanza. Tuttavia, nel caso degli esperimenti sull'anticipazione che si basano proprio sull'assunto dell'imprevedibilità, il fatto di utilizzare sequenze pseudorandom invaliderebbe il presupposto alla base dell'intero disegno sperimentale.

Fortunatamente la soluzione è incredibilmente semplice. Il problema nasce infatti dal fatto che la durata dei cicli di elaborazione dei dati attraverso i quali il computer punta alla sequenza casuale ed estrae i numeri casuali sono tutte della stessa lunghezza. Per ovviare a questo problema, ottenendo così estrazioni random "pure", è necessario utilizzare cicli di puntamento ed estrazione dei numeri casuali che non impieghino sempre lo stesso tempo. Più precisamente, è necessario utilizzare cicli il cui tempo di esecuzione sia *imprevedibile*.

Questa condizione si realizza quando nel ciclo interviene un fattore esterno la cui durata è imprevedibile.

Nel caso degli esperimenti condotti in questo studio, dove si chiede al soggetto di premere un tasto per indicare il colore che pensa sarà selezionato dal computer, il tempo di reazione è sempre diverso e imprevedibile. In altre parole, quando il tempo di scelta del soggetto, per definizione imprevedibile, allunga o contrae la distanza temporale che separa un'estrazione causale dall'altra l'indipendenza sequenziale viene ripristinata e le sequenze causali diventano imprevedibili: perfettamente random.

Per questo motivo in tutti gli esperimenti realizzati è stato dato al soggetto un compito di selezione, il cui unico vero obiettivo era quello di introdurre una variabile imprevedibile che garantisse la natura casuale della sequenza random prodotta dal computer.

3. Risultati degli esperimenti

In questo capitolo vengono presentati 3 esperimenti. Si tratta di esperimenti nei quali, di volta in volta, vengono modificate alcune condizioni al fine di comprendere in modo più approfondito l'effetto osservato.

Come è stato detto nel capitolo precedente, dopo aver individuato un cardiofrequenzimetro che consentisse di effettuare una perfetta sincronizzazione tra le misure rilevate e la presentazione delle immagine sul monitor del computer, si è iniziato a sperimentare il comportamento di stimoli di natura diversa, giungendo alla constatazione dell'efficacia, in questo tipo di esperimento, dei colori elementari: giallo, rosso, blue e verde.

Il primo esperimento presentava la stessa sequenza dei colori base: blue, verde, rosso e giallo. Il soggetto cercava di indovinare il colore che sarebbe stato scelto dal computer e il computer effettuava la sua scelta, totalmente random e la presentava su monitor. L'ipotesi è che, in presenza di anticipazione, si debba osservare, nella fase di presentazione degli stimoli, una differenza significativa tra le frequenze cardiache rilevate durante la presentazione di stimoli target (quelli che vengono successivamente selezionati dal computer) e di stimoli non target (cioè quelli che non vengono successivamente selezionati

dal computer). Questo primo esperimento ha coinvolto 24 soggetti e i risultati sono stati estremamente significativi da un punto di vista statistico.

Al fine di escludere che la differenza della frequenza cardiaca, tra target e non target, possa dipendere da cause antecedenti la scelta operata dal computer, nel secondo esperimento si è testato se la differenza continua a manifestarsi anche in assenza del feedback del colore scelto dal computer. I risultati hanno mostrato che in presenza di feedback la differenza è forte e significativa, mentre in assenza di feedback la differenza si annulla. Questo risultato esclude la possibilità che la differenza tra target e non target possa dipendere da cause antecedenti la scelta operata dal computer.

Nel terzo esperimento si è osservato che:

- I colori si comportano in modo differente a seconda della posizione nella quale sono collocati, facendo quindi pensare che l'effetto si possa propagare sottoforma di onda con picchi che possono invertirsi.
- L'effetto risulta essere tanto più forte quanto più lo stimolo è prossimo al feedback del computer.
- Quando si utilizzano immagini con numeri (in questo esperimento da 1 a 4) l'effetto risulta essere forte nell'ultima posizione, cioè quella più vicina al feedback del computer.
- Quando il computer non presenta il feedback l'effetto si annulla.

3.1 Esperimento 1

In questo esperimento vengono mostrati, su un monitor di computer, i 4 colori elementari (blue, verde, rosso e giallo) a tutto schermo ed in serie, ciascuno per un periodo di 4 secondi (*fase di presentazione*). Durante questa fase di presentazione viene misurata, ad intervalli regolari di 1 secondo, la frequenza cardiaca del soggetto. E' importante sottolineare che, a differenza dell'esperimento effettuato da Tressoldi, il cardiofrequenzimetro della SUNTO non richiede il controllo da parte di un operatore. I soggetti sperimentali conducevano perciò l'esperimento da soli, senza la presenza di altre persone nel laboratorio o nella stanza in cui si trovavano.

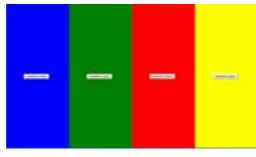
Successivamente, alla fine della presentazione in serie dei singoli colori, questi vengono mostrati sul monitor tutti insieme, divisi in quattro barre colorate, ed il compito del soggetto consiste nel tentare di indovinare il colore che verrà poi selezionato dal computer attraverso un procedimento random (*fase di scelta*).

Dopo la scelta del soggetto, il computer seleziona il colore target e lo mostra a tutto schermo (*fase di selezione e presentazione del target*).

I risultati di questo primo esperimento hanno mostrato una forte differenza prestimolo nella frequenza cardiaca durante la presentazione del colore che, successivamente, verrà selezionato dal computer (target). Per i colori blue e verde tale differenza è, in media, di 2 battiti cardiaci al minuto. Più precisamente, nei casi in cui il blue è il target si osserva, nella fase di presentazione del colore blue, un aumento anticipato della frequenza cardiaca di oltre 2 battiti per minuto, mentre quando il computer seleziona il colore verde si osserva, sempre nella fase di presentazione di tale colore, una diminuzione anticipata della frequenza cardiaca di circa 2 battiti al minuto. Questa differenza è fortemente significativa da un punto di vista statistico.

- *Descrizione dell'esperimento*

Ogni trial dell'esperimento è composto da 3 fasi.

FASE 1				FASE 2	FASE 3
<i>Presentazione delle immagini e misurazione della frequenza cardiaca</i>				Scelta 	Selezione Random 
Immagine 1	Immagine 2	Immagine 3	Immagine 4		Target
Non target	Non target	Target	Non target		
4 secondi	4 secondi	4 secondi	4 secondi	Feedback	

Tab. 6 - Fasi di un trial sperimentale

1. *Fase di presentazione delle immagini:* vengono presentate in sequenza, sul monitor del computer, i 4 colori elementari, a tutto schermo. La prima schermata è di colore blue, la seconda di colore verde, la terza di colore rosso e l'ultima di colore giallo. Ogni immagine viene presentata per 4 secondi. Il soggetto deve semplicemente guardare le immagini e, durante la loro presentazione, la sua frequenza cardiaca viene rilevata ad intervalli fissi di 1 secondo. Per ogni immagine si hanno così 4 rilevazioni: una per ogni secondo. E' importante sottolineare che la presentazione dell'immagine viene sincronizzata al millesimo di secondo con la rilevazione della frequenza cardiaca. Questa sincronizzazione si effettua facendo precedere l'inizio della sequenza, quando necessario, da una schermata bianca, per il tempo strettamente necessario al fine di realizzare la sincronizzazione. Ogni immagine viene, in questo modo, presentata esattamente allo scoccare del secondo.
2. *Fase di scelta:* alla fine della presentazione dei 4 colori viene presentata un'unica immagine formata da 4 barre colorate (blue, verde, rosso e giallo) al centro delle quali è presente un pulsante. Il soggetto deve cliccare il pulsante corrispondente al colore che ritiene sarà successivamente scelto dal computer. Si chiede cioè al soggetto di cercare di indovinare il target, cioè il colore che verrà successivamente selezionato dal computer.

3. *Fase di selezione e presentazione del target*: non appena il soggetto ha effettuato la propria scelta, il computer effettua la selezione del target grazie ad una procedura random (di selezione causale) alla fine della quale visualizza il colore selezionato, a tutto schermo, sul monitor del computer (*Feedback*).

L'esperimento è composto da 20 trial e si svolge in circa 7 minuti. Ad ogni soggetto è stato richiesto di ripetere per tre volte l'esperimento.

- *Il campione*

L'esperimento è stato condotto su un campione di 24 soggetti con età compresa tra i 15 ed i 75 anni, 14 femmine e 10 maschi. La sequenza sperimentale veniva presentata ad ogni soggetto 3 volte, per una durata complessiva dell'esperimento di poco più di 20 minuti. La frequenza cardiaca associata alle 4 immagini (4 colori) veniva rilevata 960 volte per ogni soggetto, fornendo in questo modo un campione di frequenze cardiache adatto al calcolo della significatività statistica all'interno anche dei singoli soggetti.

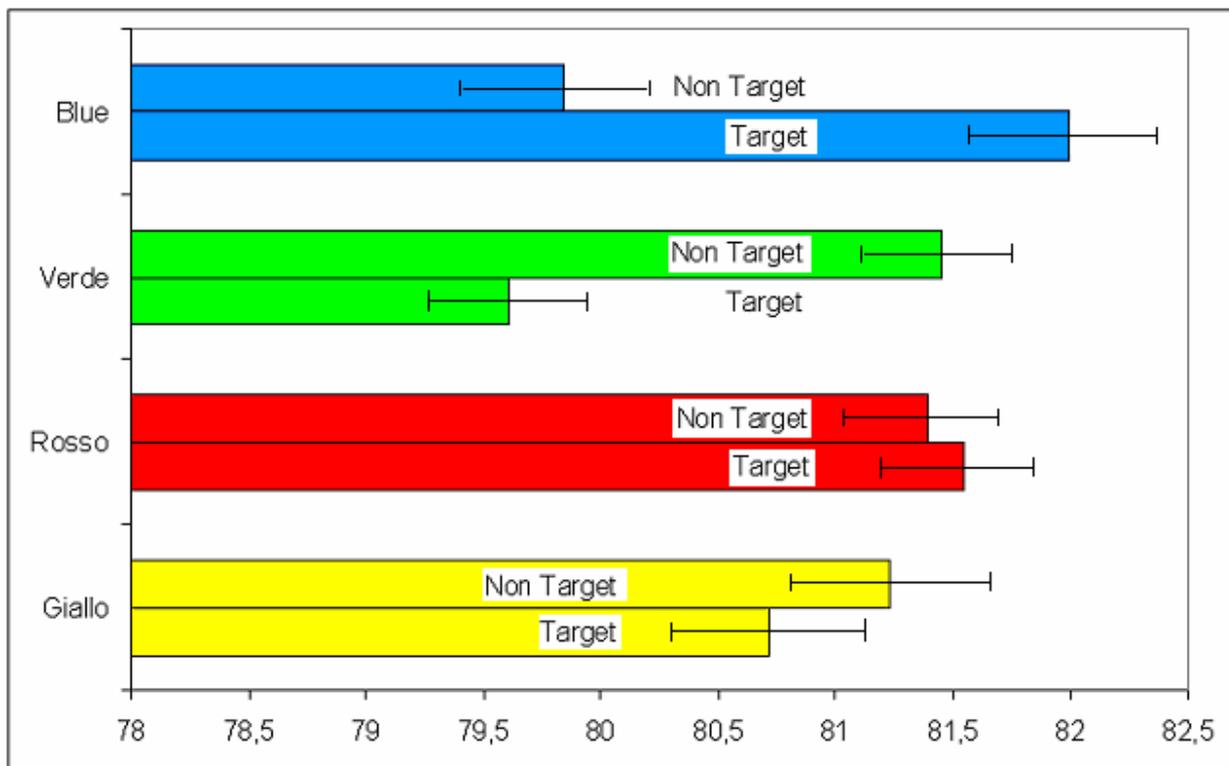
- *Ipotesi e risultati*

Per *target* si intende il colore scelto dal computer alla fine della sequenza dei 4 colori e dopo la scelta operata dal soggetto sperimentale. L'ipotesi è che, in presenza di anticipazione, si debba osservare nella fase 1, di presentazione degli stimoli, una differenza significativa tra le frequenze cardiache rilevate durante la presentazione di stimoli target (quelli che vengono successivamente selezionati dal computer) e di stimoli non target (cioè quelli che non vengono successivamente selezionati dal computer).

Prendendo in esame tutte le frequenze cardiache rilevate si osserva che la frequenza cardiaca associata ai target (valore medio 80,94) e quella associata ai non target (valore medio 80,97) non si differenziano in modo significativo. Tuttavia, non appena si effettua

l'analisi all'interno dei singoli colori, si osservano forti differenze della frequenza cardiaca per i colori blue (target 81,99 e non target 79,84) e verde (target 79,60 e non target 81,45), differenza che per il blue corrisponde ad un valore della t di Student pari a 10,74, mentre per il verde ad un valore di 8,81.

Un valore della t di Student pari a 3,291 è significativo allo 0,001, cioè indica che esiste meno di una probabilità su 1.000 di sbagliare quando si afferma che la differenza (in questo caso tra target e non target) non è dovuta al caso; un valore della t di Student di 8,81 porta la probabilità di sbagliare a diventare praticamente nulla e consente perciò di affermare, quasi con assoluta certezza, l'esistenza di una differenza tra target e non target non dovuta al caso.



Tab. 7 – Frequenza cardiaca per colore e target

E' stata effettuata una seconda analisi dei dati utilizzando il test del Chi Quadrato. La significatività statistica della differenza tra target e non target è stata calcolata confrontando il numero di misurazioni che erano superiori o inferiori alla baseline del singolo colore. Anche in

questo caso si è osservata una forte significatività statistica, con valori del Chi Quadrato superiori a 30 (la significatività statistica di $p < 0,001$ si raggiunge con valori pari a 10,8).

3.2 Esperimento 2

Durante la discussione di questi risultati un professore di fisica teorica della facoltà di Roma ha proposto l'ipotesi che l'effetto anticipatorio osservato nel primo esperimento possa dipendere dal fatto che l'emozione provata dal soggetto durante la presentazione del colore interagisca, in qualche modo, con l'elettronica del computer, andando così a determinare il colore che il computer andrà poi ad estrarre. Se questa ipotesi fosse corretta, l'effetto nella fase 1 si dovrebbe osservare anche quando il computer effettua la selezione del target senza poi visualizzarlo a monitor.

Il secondo esperimento è stato perciò ideato al fine di controllare se l'effetto osservato nella fase 1 possa dipendere da cause antecedenti la scelta operata dal computer.

L'esperimento si differenzia dal precedente per due elementi:

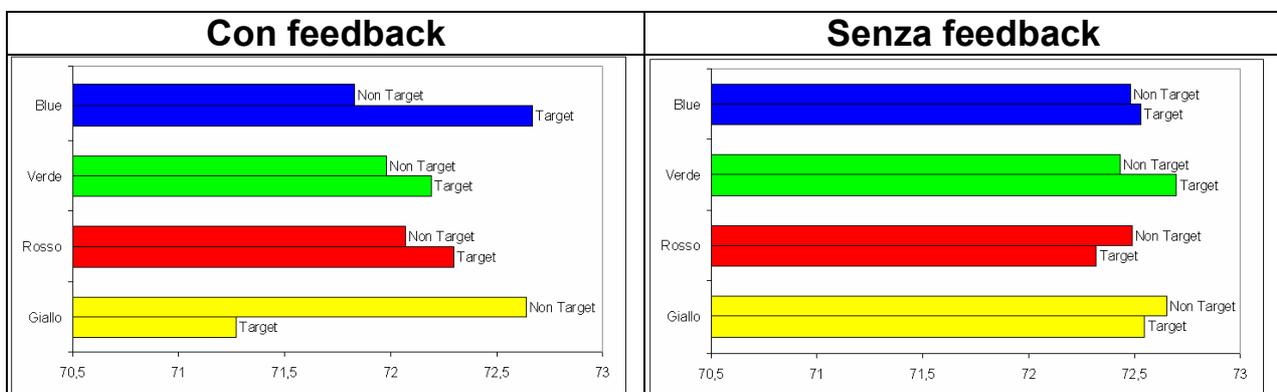
1. il computer decide, in modo assolutamente random, se visualizzare o meno il feedback, cioè il colore (target) selezionato nella terza fase del trial sperimentale.
2. Si è deciso di ridurre i tempi di presentazione dei colori, nella fase 1, da 4 a 2 secondi. Ridurre i tempi di presentazione dei colori consente infatti di aumentare la numerosità delle misure utilizzabili nell'analisi dei dati e di ridurre di conseguenza la durata dell'esperimento.

La sequenza di colori rimane la stessa: blue, verde, rosso e giallo.

Gli obiettivi di questo esperimento sono:

- verificare nuovamente l'esistenza dell'effetto anticipato;
- verificare l'eventuale assenza di effetto nella fase 1 quando non viene presentato il feedback. Più precisamente quando il computer opera la selezione del colore (fase 3), ma al posto del colore selezionato presenta una schermata grigia.

L'esperimento consiste di 100 trial per soggetto, dei quali poco più di 1/5 senza feedback. Sono stati utilizzati 8 soggetti. Come detto, i trial senza feedback vengono scelti dal computer in modo random. In totale, 151 sono stati i trial senza feedback e 649 quelli con feedback. L'n, le frequenze cardiache, totale è 3.200 (100 trial x 8 soggetti x 4 stimoli) di cui 2.596 con feedback e 604 senza. Nonostante il tempo di presentazione degli stimoli sia più breve (2 secondi anziché 4) l'effetto emerge in modo fortemente significativo per gli stimoli di colore blue e di colore giallo nella condizione con feedback (quando cioè il computer visualizza il target selezionato dal procedimento random).



Tab. 8 – frequenze cardiache medie degli stimoli target e non target

L'effetto è invece totalmente assente nel momento in cui il computer, pur effettuando la selezione del target tramite il procedimento random, non lo visualizza a monitor (condizione senza feedback).

E' interessante notare che, mentre nel primo esperimento si osservava un forte effetto sul blue e sul verde, in questo secondo esperimento l'effetto sul verde scompare per apparire sul giallo, rimane invece invariato l'effetto sul blue. Questa modulazione suggerisce che l'effetto possa dipendere da come la sequenza di colori viene composta (ordine dei colori e durata della presentazione).

In questo esperimento, come nel precedente, si è osservata una leggera tendenza ad indovinare di più di quanto fosse atteso (26% contro il 25% atteso dal caso). Tale differenza non raggiunge però la significatività statistica.

E' però interessante notare che mentre nei primi 50 trial i soggetti indovinano il 25,08% delle volte, negli ultimi 50 trial questa proporzione sale al 26,95%. Pur non essendo statisticamente significativa, questa differenza suggerisce la possibilità di un effetto apprendimento (Tab. 9).

	Primi 50 trial	Secondi 50 trial	Totale
Indovinano	25,08%	26,95%	26,04%
Non indovinano	74,92%	73,05%	73,96%
Totale	100,00% (315)	100,00% (334)	100,00% (649)

Tab. 9 – I soggetti che hanno indovinato nei trial con feedback

Se questo dato venisse confermato, esso andrebbe a supporto dell'ipotesi che i soggetti imparano ad utilizzare il segnale emozionale al fine di scegliere esiti favorevoli (indovinare di più). In un esperimento come questo in cui l'estrazione avviene in base ad un algoritmo totalmente random, imparare ad indovinare dovrebbe essere semplicemente impossibile. Infatti, le sequenze che si utilizzano sono, per definizione, *impredicibili*. Se confermato, l'effetto apprendimento suggerirebbe che i soggetti imparano progressivamente ad utilizzare i segnali emozionali che avvertono nel momento in cui viene presentato lo stimolo target, cioè lo stimolo che successivamente sarà estratto dal computer.

3.3 Esperimento 3

Il terzo esperimento è più complesso. L'obiettivo era quello di verificare:

- 1) La presenza di effetti di anticipazione, nella forma di frequenze cardiache diverse tra stimoli target e stimoli non target.
- 2) L'assenza di anticipazione quando manca ciò che viene ipotizzata come "causa" dell'effetto anticipatorio, cioè la presentazione del feedback nella terza fase del trial.
- 3) Presenza di effetti più marcati nel momento in cui la misura viene effettuata in prossimità del target presentato dal computer (*effetto posizione*).
- 4) Modulazione dell'effetto sui colori a seconda della loro posizione nella sequenza.

- Sequenza dei trial sperimentali

L'esperimento è composto da 5 trial, ognuno con una diversa sequenza di presentazione degli stimoli (tabella 10):

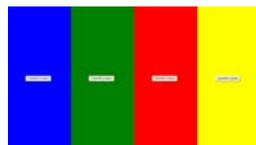
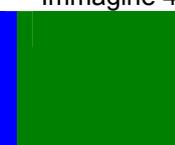
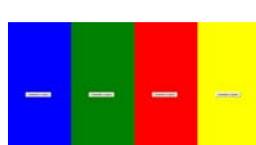
1. nel primo trial vengono presentati in successione, per 4 secondi, i colori blue, verde, rosso e giallo; il computer presenta poi tutti i colori in una schermata unica e aspetta la scelta operata dal soggetto; successivamente a tale scelta, seleziona lo stimolo target attraverso un algoritmo random e lo mostra a tutto schermo. Viene quindi presentato un tasto per avviare il trial successivo. In tale tasto viene indicato il numero di volte in cui il soggetto ha indovinato.
2. nel secondo trial vengono presentati in successione, per 4 secondi, i colori giallo, rosso, verde e blue; il computer presenta poi tutti i colori in una schermata unica e aspetta la scelta operata dal soggetto; successivamente a tale scelta, seleziona lo stimolo target attraverso un algoritmo random e lo mostra a tutto schermo. Viene quindi presentato un tasto per avviare il trial successivo. In tale tasto viene indicato il numero di volte in cui il soggetto ha indovinato.

3. nel terzo trial vengono presentati in successione, per 4 secondi, i colori rosso, giallo, blue e verde; il computer presenta poi tutti i colori in una schermata unica e aspetta la scelta operata dal soggetto; successivamente a tale scelta, seleziona lo stimolo target attraverso un algoritmo random e lo mostra a tutto schermo. Viene quindi presentato un tasto per avviare il trial successivo. In tale tasto viene indicato il numero di volte in cui il soggetto ha indovinato.
4. nel quarto trial vengono presentati in successione, per 4 secondi, i colori blue, verde, rosso e giallo; il computer presenta poi tutti i colori in una schermata unica e aspetta la scelta operata dal soggetto; successivamente a tale scelta, seleziona lo stimolo target attraverso un algoritmo random, ma questa volta non lo mostra al soggetto. Viene quindi presentato un tasto per avviare il trial successivo. In tale tasto viene indicato il numero di volte in cui il soggetto ha indovinato.
5. nel quinto ed ultimo trial vengono presentati in successione, per 4 secondi, i numeri 1, 2, 3 e 4; il computer presenta poi tutti i numeri in una schermata unica e aspetta la scelta operata dal soggetto; successivamente a tale scelta, seleziona lo stimolo target attraverso un algoritmo random e lo mostra a tutto schermo. Viene quindi presentato un tasto per avviare il trial successivo. In tale tasto viene indicato il numero di volte in cui il soggetto ha indovinato.

La sequenza dei 5 trial viene ripetuta per 20 venti volte, raggiungendo così i 100 trial per ciascun soggetto, per una durata complessiva dell'esperimento di circa 45 minuti.

La frequenza cardiaca viene rilevata durante tutto l'esperimento ad intervalli esatti di 1 secondo.

E' importante sottolineare che la scelta effettuata dal computer è perfettamente random (e non pseudorandom) in quanto l'interazione del computer con il clock è imprevedibile dipendendo dal momento in cui il soggetto effettua la sua scelta selezionando uno dei 4 stimoli con il mouse.

FASE 1 <i>Presentazione delle immagini e misurazione della frequenza cardiaca</i>				FASE 2 <i>Scelta</i> 	FASE 3 <i>Selezione Random</i> 
Trial 1					
Immagine 1  4 secondi	Immagine 2  4 secondi	Immagine 3  4 secondi	Immagine 4  4 secondi		 Feedback
Trial 2					
Immagine 1  4 secondi	Immagine 2  4 secondi	Immagine 3  4 secondi	Immagine 4  4 secondi		 Feedback
Trial 3					
Immagine 1  4 secondi	Immagine 2  4 secondi	Immagine 3  4 secondi	Immagine 4  4 secondi		 Feedback
Trial 4					
Immagine 1  4 secondi	Immagine 2  4 secondi	Immagine 3  4 secondi	Immagine 4  4 secondi		 Senza feedback
Trial 5					
Immagine 1  4 secondi	Immagine 2  4 secondi	Immagine 3  4 secondi	Immagine 4  4 secondi		 Feedback

Tab. 10 – Trial utilizzati nel terzo esperimento

- Risultati

Il campione è composto da 23 soggetti, 14 femmine e 9 maschi, in età compresa tra i 16 ed i 61 anni. Sono state effettuate due analisi dei dati, una utilizzando la seconda frequenza cardiaca misurata durante la presentazione dello stimolo, l'altra utilizzando la terza frequenza cardiaca (per ogni stimolo venivano misurate 3 frequenze cardiache). Per ciascuna analisi sono state utilizzate 400 frequenze cardiache per ogni soggetto. L'n su cui sono state effettuate le analisi è quindi $400 \times 23 = 9.200$. I risultati delle due analisi sono stati praticamente identici.

La differenza tra le frequenze cardiache rilevate durante la presentazione di uno stimolo target e uno stimolo non target è riportata nelle prossime tabelle utilizzando il test statistico della t di Student.

Questo test raggiunge i seguenti valori di significatività:

- 5% - quando il valore è uguale o supera 1,96;
- 1% - quando il valore è uguale o supera 2,576;
- 1/1000 – quando il valore è uguale o supera 3,291.

- Analisi dei primi 3 trial nei quali il computer presenta il colore selezionato

Nella tabella 11 si osserva una forte significatività statistica per i target collocati nell'ultima posizione, cioè appena prima del feedback, cioè lo stimolo scelto e visualizzato dal computer (target). In questo caso la frequenza cardiaca aumenta da una media di 78,78, osservata per i non target, ad una media di 80,37, osservata per i target.

Differenza tra target e non target associata alla posizione (primi 3 trial)	
1°	-
2°	-
3°	-
4°	6,445

Tab. 11 – Il colore rosso indica un $p < 0,001$

Come emerso già nel primo esperimento, l'effetto dei colori all'interno dello stesso trial tende a bilanciarsi: infatti, vi sono colori nei quali la frequenza cardiaca associata ai target aumenta, altri in cui diminuisce. Come si vedrà, l'effetto che si osserva in tabella 11 è confermato dal 5° trial nel quale venivano presentati numeri al posto dei colori.

- Analisi dei primi 4 trial nei quali il computer presenta il colore selezionato

Nella tabella 12 si osserva che l'effetto dei colori si modula a seconda della posizione nella quale essi vengono presentati.

E' importante sottolineare che, mentre nei primi tre trial il computer mostra a tutto schermo il target selezionato in modo random (feedback), nel quarto trial il computer opera la scelta, ma non la visualizza a monitor (schermata grigia). E' interessante notare come nell'ambito del quarto trial nessun colore abbia manifestato una differenza significativa tra target e non target. Ciò significa che quando il computer non visualizza al soggetto il target (feedback), l'effetto anticipato non si osserva.

	Trial con i colori			
	1	2	3	4
Blue	-	4,746	-3,455	-
Verde	-	-	2,839	-
Rosso	-6,649	-	-	-
Giallo	5,623	-3,894	-	-

Tab. 12 – Effetti anticipatori nei 4 trial con i colori misurati per mezzo della *t* di Student

L'assenza di significatività nel quarto trial porta ad escludere, da un punto di vista logico, che l'effetto possa dipendere da fattori antecedenti. Rimane perciò valida l'ipotesi dell'effetto anticipato.

- Analisi del quinto trial nel quale vengono presentati numeri

Il quinto trial mostra un effetto fortemente significativo (t di Student -5,7) unicamente per i target associati all'ultima posizione (la numero 4). Questo dato avvalora ulteriormente l'ipotesi secondo la quale l'effetto è maggiore quanto più ci si trova in prossimità della causa.

- Alcune considerazioni

In questo esperimento, come nel precedente, è stato effettuato il controllo della *distribuzione di frequenza piatta*. Si tratta di un controllo che consente di verificare se la distribuzione utilizzata è realmente random. Infatti, poiché tutti i termini hanno la stessa probabilità di venir estratti, nel tempo ogni stimolo dovrebbe presentare una distribuzione di frequenza che non si discosti molto da quella di ogni altro stimolo della serie. In questo esperimento lo stimolo blue è stato selezionato dal computer 547 volte, quello verde 591, il rosso 563 e il giallo 599. Tale distribuzione risponde alle aspettative di una distribuzione piatta e quindi di una procedura di estrazione casuale.

Un fatto interessante che si è notato è la differenza marcata tra i dati raccolti negli esperimenti condotti nel laboratorio di psicologia e i dati raccolti negli esperimenti condotti in casa. La significatività dei dati è meno marcata nelle prove effettuate presso il laboratorio di psicologia ed i soggetti hanno mostrato una tendenza ad indovinare nettamente inferiore. Mentre negli esperimenti effettuati a casa le persone tendevano ad indovinare quasi il 26% delle volte, negli esperimenti effettuati presso il laboratorio di psicologia la proporzione dei successi si abbassava al 23%. Questo dato sembra confermare l'ipotesi secondo la quale i

segnali emozionali tendono ad operare in modo migliore in ambienti nei quali la persona si trova a suo agio, ricchi di colori e di stimoli.

Infine, è importante sottolineare che in questo esperimento sono stati aggiunti una serie di controlli ulteriori al fine di valutare se l'effetto osservato possa dipendere da artefatti statistici. Ad esempio sono stati inseriti "target fittizi", cioè il computer ha selezionato nuovamente il target al fine di controllare se nei confronti target/non target i valori di significatività statistica potessero emergere in modo casuale. In questi controlli con target fittizio non si è mai osservata la presenza di valori statisticamente significativi nel confronto target/non target.

4. Conclusioni: simmetria del tempo, supercausalità e retrocausalità

Le pietre miliari del progresso scientifico sono state spesso segnate da scoperte controintuitive. Ad esempio:

- era intuitivo immaginare la Terra piatta, mentre era controintuitivo immaginarla rotonda;
- era intuitivo immaginare il Sole che ruota attorno alla Terra, ma controintuitivo immaginare la Terra che ruota attorno al Sole.

Oggi è intuitivo immaginare il tempo che scorre dal passato verso il futuro, ma controintuitivo immaginare che passato, presente e futuro coesistono!

Tuttavia, dalla relatività di Einstein nasce la descrizione di un universo simmetrico relativamente al verso del tempo: da una parte energia ed onde che si propagano dal passato verso il futuro, dall'altra energia ed onde che si propagano a ritroso dal futuro verso il passato e che noi, che ci muoviamo dal passato verso il futuro, sperimentiamo come *attrattori*. Einstein indicava questo nuovo modello con il termine *Übercausalität* (supercausalità) e riteneva che fosse necessario estendere l'attuale paradigma scientifico fino a comprendere questo modello.

La formula $E = mc^2$, da sempre associata all'immagine e al lavoro di Albert Einstein, fu in realtà pubblicata per la prima volta da Oliver Heaviside nel 1890 e successivamente perfezionata da Henri Poincaré (1900) e da Olinto De Pretto (1903), divenendo poi famosa con la relatività ristretta di Einstein (1905), il quale la integrò con il momento nell'equazione energia/momento/massa:

$$E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$$

In questa equazione, l'energia totale (E), in qualsiasi forma essa si manifesti, è il risultato della somma dell'energia presente nel momento (p) e nella massa (m), moltiplicate per la velocità della luce (c).

Poiché l'equazione è di secondo ordine (elevata al quadrato), per ricavare la quantità di energia totale presente nell'oggetto misurato, ossia il valore di E , è necessario calcolare la radice quadrata che, come è noto, produce sempre due soluzioni, una positiva ed una negativa. Questo perché il quadrato di un numero può essere prodotto da un numero positivo come da un numero negativo: ad esempio, 4 può essere espresso come $+2^2$ e come -2^2 . Per questo motivo, quando si calcola la radice quadrata di 4 il risultato sarà duplice: -2 e +2. Ne consegue che le soluzioni dell'equazione energia/momento/massa sono sempre due: una positiva ($+E$) e una negativa ($-E$).

E' importante notare che in base alla relatività ristretta di Einstein:

- la soluzione positiva ($+E$) descrive energia che si propaga nel verso a noi familiare, cioè dal passato verso il futuro;
- la soluzione negativa ($-E$) descrive energia che si propaga a ritroso nel tempo, dal futuro verso il passato.

Ovviamente, la soluzione negativa dell'energia fu considerata impossibile, un assurdo della matematica, in quanto se fosse stata reale avrebbe implicato l'esistenza di cause collocate

nel futuro che agivano a ritroso sul nostro presente. Questa assurdità si risolveva da sola nei sistemi inerziali in cui il momento (p) è pari a zero, cioè in quei sistemi in cui l'osservatore e l'oggetto osservato condividono le stesse velocità. In questi casi, infatti, si toglie dall'equazione energia/momento/massa la componente del momento in quanto $c^2 p^2 = 0$ e l'equazione si semplifica in $E^2 = m^2 c^4$ che sotto radice quadra diventa la $E = mc^2$ (anche in questo caso le soluzioni sarebbero due: una negativa $-E = -mc^2$ e una positiva $+E = +mc^2$).

Nel 1924 Wolfgang Pauli (premio Nobel 1945 per la fisica), studiando l'emissione spettrale dei metalli alcalini, scoprì lo spin associato alla rotazione degli elettroni su se stessi. Lo spin degli elettroni corrisponde ad un momento (p) che non può essere azzerato, in quanto parte costitutiva della materia stessa: infatti, anche un oggetto perfettamente immobile ha in sé il momento che deriva dallo spin degli elettroni di cui è composto. A questo punto, l'equazione energia/momento/massa torna necessariamente ad essere espressa, nel mondo subatomico, al quadrato, producendo così in ogni momento la scomoda soluzione ad energia negativa.

Nel 1926 Klein e Gordon inserirono l'equazione energia/momento/massa all'interno dell'equazione di Schrödinger (meccanica quantistica) allo scopo di renderla un'equazione relativistica. Klein e Gordon si trovarono così di fronte al fatto che la loro formula, nota come equazione di Klein-Gordon, presentava due soluzioni: onde che si propagano dal passato verso il futuro ($+E\Psi$) e onde che si propagano a ritroso dal futuro verso il passato ($-E\Psi$).

Nel 1928 Paul Dirac cercò di risolvere l'assurdo dell'energia negativa e delle onde che si propagano a ritroso nel tempo applicando l'equazione energia/momento/massa allo studio dell'elettrone, rendendolo in questo modo relativistico. Con sua grande sorpresa e delusione, tuttavia, la "scomoda" doppia soluzione si presentò nuovamente, nella forma dell'elettrone ($+E$) e dell'antielettrone ($-E$).

L'antiparticella dell'elettrone, inizialmente chiamata neg-elettrone da Dirac, fu poi sperimentalmente osservata nel 1932 da Carl Anderson negli sciami di raggi cosmici e da

allora indicata con il nome di *positrone*. E' importante sottolineare che Anderson fu in questo modo il primo a dimostrare l'effettiva esistenza dell'energia negativa e delle onde che si propagano a ritroso nel tempo: non solo una "stranezza" matematica, dunque, ma anche e soprattutto una realtà empirica. Dalla famosa equazione dell'elettrone formulata da Dirac discende in questo modo un universo fatto di *materia* e di onde che si muovono dal passato verso il futuro, e di *antimateria* e di onde che si muovono in senso inverso, dal futuro verso il passato.

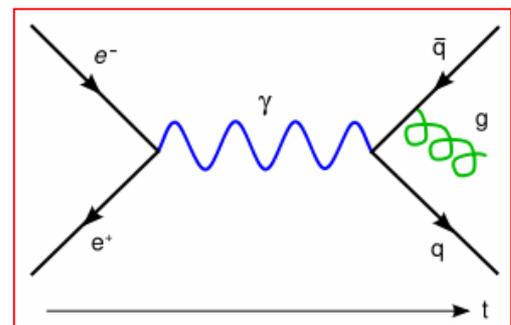
Roger Penrose nel suo libro "La Strada che Porta alla Realtà" (Penrose, 2005) sottolinea che in genere l'atteggiamento dei fisici è quello di escludere come "non fisiche" tutte quelle soluzioni che violano la causalità classica, cioè tutte quelle soluzioni in cui diventa possibile che un segnale sia inviato da qualche evento nel passato di quel medesimo evento. Penrose, pur operando egli stesso questa scelta, sottolinea che si tratta di una scelta *soggettiva* rispetto alla quale alcuni fisici hanno un atteggiamento diverso.

Penrose dedica quasi 200 pagine del suo libro al paradosso della soluzione negativa. Secondo lui è importante che il valore E dell'energia sia sempre un numero positivo. Infatti, la soluzione negativa conduce, nella fisica delle particelle, a "catastrofiche" instabilità. Sfortunatamente, nelle particelle relativistiche ciascuna delle due soluzioni della radice quadrata deve essere ritenuta una possibilità, così che persino una non fisica energia negativa deve essere valutata come una possibilità fisica. Ciò non accade però nel caso di particelle non relativistiche. In quest'ultimo caso, la quantità è definita sempre positiva e non si ha perciò l'imbarazzante radice quadrata. Penrose aggiunge che l'espressione relativistica dell'equazione di Schrödinger non offre una procedura chiara per escludere la soluzione negativa delle radici quadrate. Nel caso di una singola particella libera (o di un sistema di tali particelle non interagenti), questo non porta effettivamente ad una seria difficoltà, perché possiamo limitare l'attenzione a sovrapposizioni di soluzioni di onde piane di energia positiva dell'equazione libera di Schrödinger. Tuttavia, questo non è più il caso quando sono presenti interazioni; persino per una singola particella relativistica carica in un dato campo elettromagnetico la funzione d'onda non può, in generale, mantenere la condizione di frequenza positiva. Ciò crea un conflitto tra i principi della meccanica quantistica e quelli della

relatività ristretta. Al fine di togliere di mezzo questa imbarazzante duplice soluzione dell'energia, aggiunge l'autore, Dirac propose nel 1931 un'ipotesi che Penrose descrive come semplicemente "pazzesca". Dirac partì dal principio di Pauli, secondo il quale due elettroni non possono occupare uno stesso stato, e avanzò l'ipotesi che tutti gli stati di energia negativa fossero già occupati. Questo oceano di stati di energia negativa occupati viene ora chiamato "mare di Dirac". Secondo Dirac, gli stati di energia negativa sono pieni, impedendo così, per il principio di Pauli, che un elettrone entri in contatto con un neg-elettrone. Su questa ipotesi si fonda oggi il modello standard della fisica delle particelle.

Nonostante la fisica classica abbia rifiutato di prendere in considerazione il concetto di retrocausalità, un numero di fisici autorevoli ha lavorato e tuttora lavora su questo concetto attualmente oggetto di valutazione da parte della comunità scientifica.

L'esempio classico sono i diagrammi di Feynman sull'annichilazione elettrone-positrone. Secondo questi diagrammi, l'elettrone non si annichila al contatto con un positrone, ma il rilascio di energia è dovuto al fatto che l'elettrone inverte il suo verso del tempo trasformandosi in un positrone e iniziando a muoversi a ritroso. Quando i diagrammi di Feynman vengono interpretati essi implicano necessariamente l'esistenza della retrocausalità (Feynman, 1949).



John Archibald Wheeler e Richard Feynman hanno proposto di utilizzare la soluzione negativa dell'energia e di utilizzare la soluzione delle "onde anticipate", onde che si muovono a ritroso nel tempo, per risolvere le equazioni di Maxwell. Feynman ha anche utilizzato il concetto di retrocausalità al fine di proporre un modello del positrone in base al quale la proposta di Dirac viene reinterpretata. In questo modello, gli elettroni che si muovono indietro nel tempo acquisterebbero carica positiva (Wheeler 1945).

Yoichiro Nambu (Nobel 2008 per la fisica) ha applicato la proposta di Feynman ai processi di annichilazione delle coppie particelle-antiparticelle, giungendo alla conclusione che non si

tratta di un processo di annichilazione o di creazione di coppie particelle-antiparticelle, ma semplicemente del cambio di direzione della stessa particella, dal passato al futuro o dal futuro al passato (Nambu 1950).

Costa de Beauregard ha utilizzato il concetto di retrocausalità per spiegare il meccanismo dell'entanglement (de Beauregard, 1977) e nel giugno 2006 l'American Association for the Advancement of Science ha organizzato presso l'Università di San Diego in California un convegno dedicato al tema della retrocausalità.

Come si vede, l'idea che il tempo sia unitario e che la freccia del tempo possa essere invertita è di fatto molto recente. Fino al XIX secolo il tempo veniva considerato come irreversibile, una successione di attimi assoluti. Solo con l'introduzione della relatività ristretta inizia a farsi strada il concetto di retrocausalità.

Nel 1954 il filosofo Michael Dummet iniziò a sostenere che nei fatti non esisteva alcuna contraddizione, e che nessun elemento filosofico si oppone al fatto che gli effetti possano precedere le cause (Dummet, 1954). Più recentemente, Jan Faye dell'Università di Copenhagen ha argomentato che anche se non sarà possibile realizzare viaggi nel tempo al livello macroscopico, ciò non necessariamente nega la possibilità della retrocausalità ad altri livelli (Faye, 1994) e Jeanne Peijnenburg ha iniziato ad utilizzare il concetto di retrocausalità per descrivere come questo possa ridefinire i processi percettivi (Peijnenburg, 1999).

7. Bibliografia

- de Beauregard, Costa (1977). "Time Symmetry and the Einstein Paradox". Il Nuovo Cimento (42B).
- Dummett M. (1954), *Can an Effect Precede its Cause*, Proceedings of the Aristotelian Society (Supp. 28).
- Einstein A. (1916), *Relatività, esposizione divulgativa*, Universale Bollati Boringhieri, Torino 1967.
- Fantappiè L. (1993), *Conferenze scelte*, Di Renzo Editore, Roma 1993.

- Faye J., Scheffler U e Urchs M. (1994-10-13). *Logic and Causal Reasoning*. Wiley-VCH. ISBN 3050025999.
- Feynman R. (1949), *The Theory of Positrons*, Physical Review 76: 749.
- Herzog, T. J. et al. (1995), *Complementarity and the Quantum Eraser*, Physics Review Letters 75 (17): 3034–3037.
- Nambu Y. (1950), *The Use of the Proper Time in Quantum Electrodynamics*, Progress in Theoretical Physics (5).
- Peijnenburg, Jeanne, *Shaping Your Own Life*, Metaphilosophy vol. 37.
- Penrose R. (2004), *La strada che porta alla realtà*, Biblioteca Universale Rizzoli, Milano.
- Tressoldi P. E. (2005), Martinelli M., Massaccesi S., and Sartori L., *Heart Rate Differences between Targets and Nontargets in Intuitive Tasks*, Human Physiology, Vol. 31, No. 6, 2005, pp. 646–650.
- Vannini A., Di Corpo U. (2007), *Pre-stimuli heart rate differences*, Syntropy, 2007, 1, pp. 108-118.
- Wheeler J., Feynman R. (1945), *Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation*, Review of Modern Physics (17).