



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia Generale

Corso di laurea Magistrale in Neuroscienze e Riabilitazione Neuropsicologica

Tesi di laurea Magistrale

Associazioni spazio-numeriche (SNA) in un ambiente di realtà immersiva

Spatial-numerical associations (SNA) in an immersive reality environment

Relatore

Prof. Konstantinos Priftis

Correlatrice

Dott.ssa Caterina Dapor

Laureanda: Greta Valente
Matricola: 2091377

INDICE

RIASSUNTO	5
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE TEORICA	7
1.1. Associazioni spazio-numeriche (<i>SNA: Spatial-numerical Associations</i>)	7
1.2. Effetto SNARC orizzontale	9
1.2.1. Evidenze da studi su popolazioni cliniche	12
1.3. Effetto SNARC verticale	13
1.4. Effetto SNARC sagittale	16
1.5. Prima ipotesi alternativa: la corrispondenza di polarità	17
1.6. Seconda ipotesi alternativa: la memoria di lavoro	18
1.7. Lo studio di Aleotti et al. (2020)	19
1.8. Lo studio di Aleotti et al. (2023)	22
1.8.1. Lo studio di Basso Moro et al. (2018)	25
1.9. Le SNA in un ambiente di realtà immersiva: ipotesi di lavoro	27
CAPITOLO 2: METODO	29
2.1. Partecipanti	29
2.2. Apparato e stimoli	29
2.2.1. Apparato	29
2.2.2. Stimoli	32
2.3. Procedura	33
2.4. Disegno sperimentale	35
CAPITOLO 3: RISULTATI	37
3.1. Analisi frequentiste	37
3.1.1. Regressione lineare singola	37
3.1.2. Analisi della Varianza (ANOVA)	38
3.1.3. T-test a campione unico	39
3.1.4. Confronti a coppie (post-hoc)	40
3.2. Analisi Bayesiane	40
CAPITOLO 4: DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	43
4.1. Riassunto del presente studio e delle ipotesi di lavoro	43
4.2. Riassunto dei risultati del presente studio	44

4.3.	Confronto con i risultati di studi precedenti	45
4.4.	Limiti del presente studio e proposte per studi futuri	46
4.5.	Conclusioni	48
BIBLIOGRAFIA		51
APPENDICE		57
	<i>Modulo 1</i>	<i>57</i>
	<i>Modulo 2</i>	<i>60</i>
	<i>Modulo 3</i>	<i>62</i>

RIASSUNTO

Nel Capitolo 1, sono state riportate le basi teoriche e le ipotesi di lavoro sottostanti al presente studio. Infatti, lo studio sperimentale descritto in questo lavoro di tesi si inserisce all'interno della cornice teorica che da tempo mira ad indagare l'esistenza di associazioni spazio-numeriche (*SNA: Spatial-numerical Associations*). Gli studi più consistenti sono stati quelli mirati a indagare l'ipotesi secondo cui i numeri piccoli vengono elaborati più velocemente con risposte eseguite nello spazio sinistro, mentre i numeri grandi vengono elaborati più velocemente con risposte eseguite nello spazio destro (Dehaene et al., 1993). Questo effetto è stato denominato effetto SNARC (*Spatial-numerical Associations of Response Codes*; Dehaene et al., 1993).

Progressivamente, l'interesse per questa relazione tra spazio e numero è cresciuto, come anche le ricerche sull'effetto SNARC. Queste ricerche si sono estese non solo sull'asse orizzontale (sinistra/destra), ma anche sull'asse verticale (su/giù; Hartmann et al., 2012; Ito & Hatta, 2004; Wiemers et al., 2014) e sull'asse sagittale (vicino/lontano; Chen et al., 2015; Santens & Gevers, 2008). Le prove sperimentali intendevano indagare l'associazione dei numeri piccoli ai lati sinistro, basso o vicino dello spazio, e l'associazione dei numeri grandi ai lati destro, alto o lontano dello spazio.

Successivamente, Aleotti et al. (2020) hanno suggerito l'esistenza di tre SNA indipendenti e ugualmente forti, una per ciascun asse (orizzontale, verticale e sagittale). Inoltre, Aleotti et al. (2023) hanno proposto che le SNA emerse lungo i tre assi cartesiani, se combinate, possono interagire tra loro. Più precisamente, si voleva verificare se i numeri piccoli venivano elaborati più velocemente tramite risposte eseguite, simultaneamente, nello spazio sinistro, basso e vicino. Analogamente, si proponeva di appurare se i numeri grandi venivano elaborati più velocemente tramite risposte eseguite, simultaneamente, nello spazio destro, alto e lontano.

Per verificare tali ipotesi, Aleotti et al. (2020, 2023) hanno utilizzato risposte spazialmente lateralizzate. Per questo motivo, dai risultati di Aleotti et al. (2020, 2023) non è stato possibile distinguere se l'interazione tra più SNA avvenga solo a livello di selezione della risposta o anche a livello semantico. Il presente studio,

dunque, ha inteso approfondire la possibilità che i tre assi cartesiani possano interagire a livello semantico, lateralizzando la posizione dei numeri target sullo schermo, ma mantenendo il pulsante di risposta fisso in posizione centrale (cioè non lateralizzato). L'ipotesi che volevamo verificare era la seguente: se le molteplici SNA interagiscono solo a livello di selezione della risposta, allora l'interazione tra i tre assi cartesiani sarebbe dovuta scomparire. Al contrario, se le molteplici SNA interagiscono (anche) a livello semantico, allora l'interazione sarebbe stata comunque osservata. L'interazione degli assi cartesiani è stata indagata mappando diagonalmente i numeri nello spazio, in modo tale da generare quattro Piani.

Il Capitolo 2 è stato dedicato alla descrizione dettagliata del disegno sperimentale, dei materiali e del metodo di questo specifico studio. Il compito dei partecipanti consisteva nel giudicare il più rapidamente possibile, premendo un unico tasto centrale, la parità di numeri arabi presentati in diverse posizioni spaziali all'interno di un ambiente di realtà immersiva. Abbiamo scelto un ambiente di realtà immersiva, in modo da consentire una percezione realistica della tridimensionalità dei numeri nello spazio.

Nel Capitolo 3 sono state riportate le analisi condotte e i risultati ottenuti. Ciò che è emerso dai risultati dell'ANOVA a misure ripetute è che l'effetto principale del Piano è risultato significativo, ma con una grandezza dell'effetto piccola. Per indagare la presenza dell'effetto SNARC su ciascun Piano, sono stati eseguiti quattro *t*-test, ma nessuno è risultato significativo, suggerendo l'assenza dell'effetto SNARC. Questi stessi risultati sono stati confermati dalle analisi bayesiane.

Infine, nel Capitolo 4, sono stati discussi i risultati ottenuti, i quali non hanno confermato le nostre ipotesi di partenza, perché su nessun Piano sono emerse SNA significative. In virtù della solida letteratura scientifica di riferimento, non era stata formulata a priori un'ipotesi che prevedesse questo possibile scenario. Abbiamo, dunque, cercato di spiegare le possibili ragioni di tale esito inaspettato e, al contempo, abbiamo provato a proporre nuovi spunti per possibili studi futuri.

CAPITOLO 1:

INTRODUZIONE TEORICA

1.1. Associazioni Spazio-Numeriche (SNA: *Spatial-numerical Associations*)

L'intuizione che lo spazio e i numeri siano in qualche modo relati era stata espressa fin dal XVIII secolo da Kant (1781/1904). Kant ipotizzò, infatti, che le proprietà numeriche potessero essere associate a specifiche direzioni nello spazio. Kant considerava lo spazio e il tempo come forme pure a priori dell'intuizione, fondamentali per l'esperienza del mondo. Queste forme esistono prima di qualsiasi esperienza sensoriale e sono necessarie per organizzare le informazioni che riceviamo. Secondo la concezione kantiana i numeri non sono solo entità astratte, bensì sono anche rappresentati spazialmente nella mente umana. Questo suggerisce che la nostra comprensione dei numeri è influenzata dalle nostre intuizioni spaziali (Kant, 1781/1904).

Circa un secolo dopo, Galton (1880) formulò per la prima volta l'idea che la rappresentazione dei numeri potesse essere organizzata in uno spazio. Durante le sue indagini sulle immagini mentali, Galton osservava che gli individui, per rappresentare mentalmente i numeri, tendevano a visualizzare sequenze numeriche in disposizioni spaziali personali e stabili. Nello stesso studio, egli descrisse diverse testimonianze verbali riguardanti la visualizzazione consapevole dei numeri, a volte caratterizzata da colori specifici. Tra queste testimonianze, Galton menzionò la presenza di una linea numerica che si estendeva dall'estremità sinistra (numeri piccoli) a quella destra (numeri grandi; Galton, 1880). Queste testimonianze hanno rappresentato le prime descrizioni introspettive di una "linea dei numeri". Quindi, Kant e Galton sono stati due precursori dell'ipotesi di una rappresentazione mentale dei numeri organizzata spazialmente.

Questo fenomeno di raffigurazione numerica su una linea ordinata è stato successivamente supportato da diverse scoperte scientifiche. In particolare due effetti descrivono bene questo fenomeno: l'effetto distanza (o *distance effect*) e l'effetto grandezza (o *effect size*). L'effetto distanza, descritto per la prima volta da Moyer e Landauer (1967), indica che i tempi di reazione (TR) in un compito di confronto di grandezza numerica (scegliere il più grande tra due numeri) aumentano quando la

distanza tra i due numeri si riduce. L'effetto grandezza, invece, fa riferimento all'aumentare del tempo di reazione nel discriminare quale numero sia il maggiore o il minore, all'aumentare della grandezza numerica dei due numeri (Moyer & Landauer, 1967).

In base agli effetti distanza e grandezza, diversi studiosi hanno esaminato una rappresentazione spaziale dei numeri da sinistra (numeri piccoli) a destra (numeri grandi), utilizzando compiti di confronto di grandezze numeriche (ad es. Dehaene et al., 1990). Secondo Restle (1970) questa rappresentazione numerica può essere paragonata a una "linea numerica mentale", perché ha una corrispondenza naturale con le coordinate sinistra-destra dello spazio esterno. In altre parole, per "linea numerica mentale" si intende un *continuum* analogico in cui la grandezza numerica è rappresentata lungo un asse orientato (Dehaene, 1992; Restle, 1970).

Dehaene (1992) ha presentato un modello (*Triple Code Model*) che illustrava il concetto dell'organizzazione spaziale della rappresentazione dei numeri. Secondo questo modello, i numeri possono essere rappresentati mentalmente attraverso tre diversi codici: arabico, verbale e analogico. Il codice arabico, in cui i numeri sono rappresentati come sequenze di cifre arabe, è localizzato nelle aree occipito-temporali inferiori ventrali di entrambi gli emisferi cerebrali. Il codice verbale, in cui i numeri sono rappresentati come sequenze di parole organizzate sintatticamente, è associato alle aree perisilviane dell'emisfero sinistro. Infine, il codice analogico, in cui le grandezze numeriche sono rappresentate lungo una linea numerica mentale, è localizzato all'interno del solco intra-parietale bilateralmente (Dehaene & Cohen, 1995). Tra queste tre forme di rappresentazione, la linea numerica mentale è ritenuta quella privilegiata per elaborare la grandezza numerica (Dehaene, 1992).

Il concetto di SNA è stato esplorato per la prima volta in modo approfondito da Dehaene et al. (1993). Un esempio di SNA è l'effetto SNARC (*Spatial-numerical Associations of Response Codes*: Associazioni spazio-numeriche dei codici di risposta) che descrive l'associazione automatica tra la grandezza numerica e la posizione spaziale delle risposte registrate attraverso tasti lateralizzati (Dehaene et al., 1993). L'effetto SNARC, successivamente, è stato riportato lungo tutti e tre gli assi cartesiani (orizzontale, verticale, sagittale; Winter et al., 2015).

1.2. Effetto SNARC orizzontale

L'effetto SNARC è stato riportato per la prima volta da Dehaene et al. (1993) che hanno evidenziato una correlazione tra il valore numerico e l'asse spaziale orizzontale. I partecipanti dovevano svolgere un compito di giudizio di parità. Più precisamente, il compito consisteva nello stabilire se una cifra araba presentata al centro dello schermo fosse pari o dispari. Nello specifico, era richiesto ai partecipanti di premere un tasto se il numero, presentato centralmente sullo schermo, era pari, e un altro tasto se il numero era dispari.

I risultati mostrarono che le risposte ai numeri relativamente piccoli erano più veloci quando venivano eseguite con il tasto sinistro. Viceversa, le risposte ai numeri relativamente grandi erano più veloci quando venivano eseguite con il tasto destro (Dehaene et al., 1993). Questo vantaggio nelle risposte, dato dalla congruenza spaziale tra il lato di risposta (spazio destro o sinistro) e la posizione relativa della grandezza numerica rappresentata sulla linea numerica mentale, orientata da sinistra a destra, è stato, appunto, definito dagli autori effetto SNARC.

È interessante notare che, nello studio di Dehaene et al. (1993), l'accesso alla grandezza del numero avveniva automaticamente. Infatti, il compito di giudizio di parità poteva essere eseguito correttamente senza la necessità di accedere alle informazioni sulla grandezza numerica. Queste evidenze potrebbero suggerire che quando le persone eseguono un compito che coinvolge i numeri, potrebbero automaticamente attivare una mappa mentale in cui i numeri piccoli sono associati alla sinistra e quelli grandi alla destra. Questa associazione rifletterebbe un'organizzazione spaziale della grandezza numerica (de Hevia et al., 2006).

Dehaene et al. (1993) hanno mostrato che l'effetto SNARC risultava specifico per i numeri e non emergeva quando i numeri venivano sostituiti con le lettere. Tuttavia, i risultati di altri studi hanno rilevato un effetto di congruenza spaziale utilizzando stimoli ordinati non numerici; ad esempio, i mesi dell'anno, le lettere dell'alfabeto (Gevers et al., 2003) e i giorni della settimana (Gevers et al., 2004).

È stata ipotizzata l'esistenza di uno stretto legame tra l'orientamento della linea mentale orizzontale e le convenzioni di lettura e scrittura (Shaki & Fischer, 2008; Zebian, 2005). Ad esempio, Shaki et al. (2009) hanno testato l'influenza dei fattori culturali sulle SNA. Più nello specifico, questi autori hanno esaminato la prestazione a un compito di giudizio di parità da parte di tre diversi gruppi, costituiti da partecipanti canadesi, palestinesi e israeliani. I partecipanti canadesi hanno mostrato una

mappatura dei numeri orientata da sinistra a destra. I partecipanti palestinesi, che leggono e scrivono in arabo, hanno mostrato una mappatura numerica invertita, da destra a sinistra (Shaki et al., 2009). Infine, i partecipanti israeliani, che leggono e scrivono le parole ebraiche da destra a sinistra, ma i numeri arabi da sinistra a destra, hanno mostrato una SNA da sinistra a destra debole e non consistente, probabilmente a causa della conflittualità delle direzioni opposte nella lettura di parole e numeri (Shaki et al., 2009). Questi risultati hanno sostenuto l'importante ruolo della cultura nella definizione dell'orientamento della linea numerica mentale che è stata, infatti, definita anche linea "culturale" da Gobel et al. (2011).

Nonostante la presenza di fattori culturali sottostanti alle SNA, esse potrebbero essere innate. Per esempio, de Hevia e Spelke (2010) hanno indagato la capacità di lattanti di otto mesi, di mettere in relazione le dimensioni dello spazio e del numero tramite il paradigma di abituazione/novità¹. Sono stati condotti quattro esperimenti. L'obiettivo principale del primo esperimento era capire se i lattanti potessero associare un cambiamento numerico (aumento o diminuzione del numero di elementi) a un cambiamento spaziale (lunghezze più grandi o più piccole). Prima sono state mostrate ai lattanti delle sequenze di punti che raddoppiavano o dimezzavano di numero nel tempo (ad es. da 4 a 8 a 16, o viceversa).

Dopo che i lattanti si erano abituati a questo schema numerico, de Hevia e Spelke (2010) hanno sostituito i numeri con linee orizzontali, che raddoppiavano o dimezzavano in lunghezza. Se i lattanti avessero associato spontaneamente il numero allo spazio, avrebbero dovuto guardare più a lungo le sequenze spaziali che seguivano lo stesso schema numerico a cui si erano abituati (ad es., se avevano visto numeri crescere, avrebbero dovuto preferire linee che aumentavano in lunghezza). I lattanti hanno effettivamente mostrato questa preferenza. Questo suggerisce che, fin dai primi mesi di vita, tendiamo ad associare quantità numeriche a grandezze spaziali, senza aver bisogno di impararlo prima.

Dopo il primo esperimento, de Hevia e Spelke (2010) hanno voluto escludere che i lattanti si fossero basati su caratteristiche non numeriche, come la densità degli oggetti o la loro disposizione. L'idea era capire se i lattanti stessero davvero usando il numero come criterio di riferimento, o se si affidavano ad altri segnali visivi.

¹ Questo paradigma si basa sul principio che fin dai primi mesi di vita, i lattanti tendono a perdere interesse per uno stimolo che vedono ripetutamente (abituazione) e a recuperare l'attenzione quando viene presentato uno stimolo nuovo (novità; Fantz, 1964).

Per fare questo, le studiose hanno fatto in modo che la dimensione complessiva dei punti rimanesse costante, e che la densità non fosse più correlata al numero. In questo esperimento, i lattanti sono stati esposti a una serie di display in cui più punti erano sempre accompagnati da una linea più lunga.

Dopo la fase di familiarizzazione, ai lattanti sono state sottoposte delle prove di test in cui venivano presentati nuovi numeri e nuove lunghezze di linea (de Hevia & Spelke, 2010). Alcuni display seguivano la stessa regola vista in precedenza (più punti associati alla linea più lunga), mentre altri display presentavano una relazione inversa (più punti associati alla linea più corta). I risultati hanno mostrato che i lattanti hanno preferito guardare i display che mantenevano la stessa relazione vista nella fase di familiarizzazione. Questo suggerisce che i lattanti hanno assimilato l'associazione tra quantità di punti e lunghezza della linea confermando che stavano effettivamente rispondendo alla relazione tra numero e lunghezza e non ad altri fattori.

Il terzo esperimento è stato condotto per capire se i lattanti preferissero associare naturalmente un numero maggiore di elementi a una linea più lunga, oppure se potessero imparare anche l'associazione opposta (più elementi con linee più corte; de Hevia & Spelke, 2010). Dunque, questa volta più punti erano accompagnati da una linea più corta. Dopo la familiarizzazione, i lattanti hanno visto le stesse prove di test presentate nel secondo esperimento: una con la relazione inversa appresa e una con la relazione positiva. In questo caso, però, non è emersa una preferenza chiara, perché i lattanti non hanno mostrato di aver imparato la relazione inversa come era, invece, accaduto per la relazione positiva. Inoltre, confrontando i risultati dei due esperimenti, è emerso che la relazione positiva del secondo esperimento è stata appresa e generalizzata con più facilità rispetto alla relazione inversa. Potrebbe darsi, dunque, che i lattanti abbiano una preferenza innata per associare numeri più grandi con dimensioni più grandi, rendendo più facile l'apprendimento di questa relazione rispetto all'accoppiamento inverso.

Nel quarto e ultimo esperimento, de Hevia e Spelke (2010) hanno provato a invertire il loro paradigma. Infatti, questa volta i lattanti sono stati abituati a una sequenza di linee orizzontali che raddoppiavano o dimezzavano in lunghezza. Poi si è passati ai numeri, mostrando sequenze di array numerici che cambiavano in modo coerente o incoerente con lo schema delle linee. A differenza dei precedenti espe-

rimenti, i lattanti non hanno mostrato una chiara preferenza per la sequenza numerica coerente con la sequenza spaziale vista prima. Questo suggerisce che, almeno nei primi mesi di vita, la mappatura tra numero e spazio è unidirezionale: i lattanti collegano il numero allo spazio, ma non necessariamente lo spazio al numero. Questa scoperta sottolinea che la nostra tendenza a rappresentare i numeri lungo una linea mentale (con i numeri piccoli a sinistra e quelli grandi a destra) potrebbe avere basi innate e non derivare solo dall'educazione o dalla cultura.

Bulf et al. (2016) hanno condotto uno studio sui lattanti di otto mesi, attraverso il sistema di registrazione dei movimenti oculari (*eye tracking*). Questi autori hanno osservato che i lattanti di otto mesi si orientavano più velocemente verso stimoli bersaglio a sinistra quando essi erano preceduti da un numero piccolo (espresso in formato non simbolico sotto forma di matrici di punti). Al contrario, i lattanti si orientavano verso stimoli bersaglio a destra quando essi erano preceduti da un numero grande. Questi risultati hanno suggerito che la predisposizione a mettere in relazione le rappresentazioni della grandezza numerica con la lunghezza spaziale si sviluppi nelle prime fasi della vita, prima dell'acquisizione del linguaggio.

1.2.1. Evidenze da studi su popolazioni cliniche

Un'interessante evidenza a favore di una SNA orizzontale proviene da pazienti affetti da un disturbo neuropsicologico: il neglect. Si tratta di un disturbo della consapevolezza dello spazio controlesionale (Karnath, 2012). Il neglect emerge di solito dopo una lesione all'emisfero cerebrale destro. Conseguentemente, i pazienti che ne sono affetti non riescono a orientarsi, riportare o descrivere verbalmente stimoli situati nello spazio controlesionale. Infatti, il neglect è più frequente e grave in seguito a cerebrolesioni destre che compromettono lo spazio sinistro (neglect sinistro; Karnath, 2012).

Zorzi et al. (2002) hanno chiesto a dei pazienti con neglect di trovare il numero "a metà strada" di un intervallo numerico (bisezione numerica mentale), come ad esempio: *"Qual è il numero a metà tra 1 e 9?"*. Invece di rispondere "5", molti pazienti rispondevano "7" o "8", spostandosi troppo verso "destra" della risposta corretta. Questo comportamento era simile a quello che questi pazienti manifestavano nel compito di bisezione della linea. Questo compito è uno dei test clinici più comunemente impiegati per valutare il neglect. Nel compito di bisezione di linea, in generale, i pazienti tendono a ignorare la parte sinistra della linea e marcano il centro

soggettivo della linea più a destra del centro obiettivo. Zorzi et al. (2002) hanno concluso che il neglect non riguarda solo lo spazio percepito dai pazienti, ma anche la loro rappresentazione mentale dei numeri sulla linea numerica mentale.

Priftis et al. (2006) hanno studiato gli effetti del neglect su un compito di bisezione numerica mentale e su un compito SNARC. Gli effetti del neglect sono stati osservati nel compito di bisezione numerica mentale, ma non in un compito per elicitare l'effetto SNARC (Priftis et al., 2006). Questa differenza dipende probabilmente dal fatto che, nell'effetto SNARC, la linea numerica mentale si attiva in modo automatico e inconsapevole, mentre il compito di bisezione numerica richiede un accesso diretto e consapevole alla rappresentazione mentale dei numeri nello spazio (Priftis et al., 2006). I risultati riportati da Priftis et al. (2006) e Zorzi et al. (2002) hanno suggerito che le SNA possono manifestarsi anche in compiti che non necessitano di risposte lateralizzate (ad es. bisezione numerica mentale).

1.3. Effetto SNARC verticale

Ito e Hatta (2004) hanno indagato la presenza dell'effetto SNARC verticale. L'effetto SNARC era stato già osservato in diverse popolazioni della cultura occidentale (Brysbaert, 1995; Dehaene et al., 1993; Fias et al., 1996), ma non era stato mai indagato nei giapponesi. Pertanto, Ito e Hatta (2004) hanno cercato di replicare l'effetto SNARC con partecipanti giapponesi, i quali hanno un'abitudine sia alla scrittura da sinistra a destra, sia a quella dall'alto verso il basso. Innanzitutto ai partecipanti è stato chiesto di collocare i numeri da 0 a 9 su una linea orizzontale e su una verticale. I risultati hanno confermato che la maggior parte dei partecipanti ha avuto una rappresentazione numerica da sinistra a destra e dal basso verso l'alto.

Successivamente, è stato condotto un compito di giudizio di parità (Ito & Hatta, 2004). Ai partecipanti veniva mostrato un numero arabo tra 1 e 9 (escluso il 5) ed essi dovevano determinare se fosse pari o dispari, premendo uno dei due pulsanti disposti verticalmente. I partecipanti dovevano premere il pulsante superiore con l'indice della mano sinistra o il pulsante inferiore con l'indice della mano destra. Ito e Hatta (2004) hanno osservato che i partecipanti rispondevano più velocemente quando i numeri grandi venivano elaborati tramite risposte eseguite con il pulsante nello spazio superiore e i numeri piccoli tramite risposte eseguite con il pulsante nello spazio inferiore. Questi risultati hanno mostrato l'esistenza di uno SNARC anche verticale.

Schwarz e Keus (2004) sono stati tra i primi a individuare un effetto di compatibilità numero-risposta verticale. I due autori, mediante l'*eye tracking*, hanno provato che i movimenti oculari (saccadi) verso l'alto erano innescati più velocemente in risposta a numeri grandi, mentre quelli verso il basso erano innescati più velocemente in risposta a numeri piccoli.

Hartmann et al. (2012) hanno usato un compito di generazione di numeri casuali (*RNG: Random Number Generation*), mentre i partecipanti venivano spostati da una macchina in grado di sollevare tutto il loro corpo. I partecipanti hanno generato numeri più grandi quando venivano spostati verso destra o verso l'alto e numeri più piccoli quando venivano spostati verso sinistra o in basso. È emerso, invece, che il movimento avanti e indietro non comportava differenze significative sul compito di RNG (Hartmann et al., 2012). Infine, Winter e Matlock (2013) hanno riportato che quando i partecipanti dovevano svolgere il compito di RNG, mentre giravano la testa su e giù, tendevano a generare numeri più grandi quando guardavano in alto rispetto a quando guardavano in basso.

Uno studio molto importante relativo alle associazioni spazio-numeriche lungo l'asse verticale è stato condotto da Wiemers et al. (2014). In esso sono state confrontate le associazioni orizzontali e verticali nell'aritmetica mentale. L'idea delle SNA era stata utilizzata per formulare teorie dell'aritmetica mentale. Secondo queste teorie, l'aggiunta o la sottrazione di numeri implicava un processo cognitivo che può essere descritto come spostamento dell'attenzione verso destra o sinistra su una rappresentazione spaziale di grandezza numerica (Knops et al., 2009; McCrink et al., 2007; Pinhas & Fischer, 2008).

Wiemers et al. (2014) hanno chiesto ai partecipanti di eseguire lenti movimenti continui del braccio nella dimensione orizzontale (verso sinistra o destra) o verticale (verso l'alto o verso il basso), mentre risolvevano problemi di addizione o sottrazione. Il presupposto teorico di questo studio è stato l'*Operational Momentum Effect* (OME), un fenomeno cognitivo osservabile nei processi di calcolo mentale.

Nell'OME, durante l'addizione, le persone tendono a sovrastimare il risultato, mentre durante la sottrazione tendono a sottostimarli. Questo effetto sembrava associato alla direzione del movimento del braccio nello spazio. Dunque, l'ipotesi di Wiemers et al. (2014) era che l'elaborazione di problemi aritmetici fosse più efficiente durante l'esecuzione di un'azione compatibile rispetto all'esecuzione di un'azione incompatibile. Per esempio, nel caso dell'addizione il movimento compatibile

era a destra e in alto. Al contrario, nel caso della sottrazione, il movimento compatibile era a sinistra e in basso. Il compito dei partecipanti era quello di portare il braccio in posizione centrale spostando un punto rosso in una cornice quadrata presentata centralmente. L'indicazione del movimento verso cui dovevano spostare il punto rosso veniva indicata da una freccia che puntava nelle quattro direzioni indagate (destra, sinistra, alto, basso). A seguire, veniva presentato il problema aritmetico da risolvere e simultaneamente il partecipante doveva eseguire il movimento del braccio, cercando di riportare il risultato del problema il più velocemente possibile.

I risultati di Wiemers et al. (2014) hanno supportato l'ipotesi che entrambe le rappresentazioni spaziali fossero coinvolte nell'aritmetica mentale. Nello specifico, quando i partecipanti eseguivano un'operazione compatibile con la direzione del movimento del braccio (ad esempio, aggiungere mentre lo muovevano a destra o in alto, oppure sottrarre mentre lo muovevano a sinistra o in basso), le loro prestazioni risultavano migliori. Al contrario, quando eseguivano un'operazione incompatibile con la direzione del movimento del braccio, le loro prestazioni risultavano peggiori. Soprattutto, è stato osservato che le operazioni aritmetiche erano significativamente influenzate dalla direzione del movimento del braccio lungo l'asse verticale, indicando che uno spazio numerico organizzato verticalmente sia coinvolto nell'aritmetica mentale. Infatti, l'effetto era più pronunciato nella dimensione verticale rispetto a quella orizzontale, suggerendo che l'organizzazione verticale dello spazio numerico mentale possa avere un ruolo predominante nelle operazioni di calcolo mentale (Wiemers et al., 2014). Tuttavia, questo esito potrebbe essere stato influenzato da una variabile non considerata, e cioè lo sforzo fisico richiesto per i movimenti verticali. Questo significa che i partecipanti potrebbero aver associato maggiore sforzo con l'addizione e minore sforzo con la sottrazione, invece di basarsi su una rappresentazione mentale dello spazio numerico verticale. Questa variabile, invece, non può aver influenzato i movimenti orizzontali, perché muoversi a destra o a sinistra richiede lo stesso sforzo.

Per cercare di controllare l'influenza dello sforzo fisico sui movimenti verticali, Wiemers et al. (2014) hanno condotto un secondo esperimento, questa volta misurando i movimenti oculari, che sono meno soggetti alla fatica gravitazionale (Collewijn et al., 1988). Pertanto, al centro dello schermo apparivano i problemi aritmetici che iniziavano a muoversi lentamente in una delle quattro direzioni in maniera

casuale. I risultati mostravano che i partecipanti risolvevano meglio i problemi quando l'addizione era associata a un movimento oculare verso l'alto e la sottrazione a un movimento oculare verso il basso. La stessa cosa non si è evinta per i movimenti orizzontali. Questo secondo esperimento ha permesso di concludere che l'effetto osservato non dipendeva dallo sforzo fisico, ma da un'associazione tra l'aritmetica mentale e la rappresentazione mentale spaziale dei numeri sull'asse verticale.

1.4. Effetto SNARC sagittale

In tempi più recenti, la ricerca sulle SNA ha esplorato l'asse sagittale, che riguarda la profondità nello spazio. Ad esempio, Santens e Gevers (2008) hanno sostenuto che un effetto SNARC non esisteva solo per la dimensione orizzontale (sinistra/destra). Nella loro ricerca, infatti, questi autori hanno fornito la prova di un'associazione tra la grandezza numerica e le risposte vicine e lontane. Durante l'esperimento, i partecipanti dovevano giudicare l'entità di un numero (1, 4, 6 o 9) rispetto a uno standard predefinito (5), spostando l'indice destro in una posizione vicina o lontana su una tastiera di un computer.

Santens e Gevers (2008) hanno ipotizzato che se ci fosse una mappatura diretta tra le posizioni sulla linea numerica e le posizioni nello spazio esterno, allora le risposte vicine avrebbero dovuto essere facilitate più fortemente per i numeri numericamente vicini (4, 6) rispetto ai numeri numericamente lontani. Al contrario, le risposte lontane avrebbero dovuto essere facilitate più fortemente per i numeri numericamente lontani (1, 9) rispetto ai numeri numericamente vicini. Di fatto, non è emersa nessuna interazione tra la distanza numerica dallo standard e la posizione di risposta. È emersa, invece, un'interazione tra la grandezza numerica relativa allo standard e la posizione di risposta. I risultati, quindi, hanno mostrato che i numeri piccoli (1, 4) erano associati a una risposta ravvicinata, mentre i numeri grandi (6, 9) erano associati a una risposta lontana, indipendentemente dalla direzione del movimento (sinistra/destra). Per questa ragione, i risultati di questo studio hanno suggerito che l'effetto SNARC non poteva essere considerato una prova definitiva dell'esistenza di una linea numerica mentale spazialmente orientata (Santens & Gevers, 2008).

Secondo Rizzolatti et al. (1981), per interagire con l'ambiente, il nostro encefalo ha bisogno di elaborare un'ampia gamma di informazioni riguardanti le dimensioni e la posizione spaziale del nostro corpo e delle sue parti. Lo spazio peripersonale, che si riferisce alla regione che circonda il corpo che si trova alla portata del braccio di una persona, ha un ruolo importante nelle nostre azioni verso gli oggetti intorno a noi. Sulla medesima scia teorica, Chen et al. (2015) hanno conferito un ruolo importante allo spazio peripersonale. Questi autori ritenevano, infatti, che per una comprensione completa dei meccanismi in comune tra la rappresentazione dello spazio e dei numeri, fosse necessario includere anche la rappresentazione della distanza dal corpo.

Chen et al. (2015) hanno indagato come i numeri potessero essere mappati a distanza ravvicinata o lontana rispetto al corpo. Nel loro primo esperimento, hanno chiesto ai partecipanti di giudicare la parità dei numeri, utilizzando una tastiera ruotata di 90° in senso antiorario, alle due estremità della quale erano posti i tasti di risposta. I risultati hanno confermato l'esistenza di una SNA sull'asse sagittale: i numeri più piccoli erano rappresentati nello spazio vicino, mentre quelli più grandi nello spazio lontano (Chen et al., 2015). Queste evidenze hanno suggerito che la nostra rappresentazione mentale dei numeri non si limita alle dimensioni orizzontale e verticale, ma include anche la profondità (asse sagittale), arricchendo la nostra comprensione delle interazioni tra spazio e cognizione numerica.

1.5. Prima ipotesi alternativa: la corrispondenza di polarità

Un'ipotesi alternativa che potrebbe spiegare le SNA, lungo le tre dimensioni spaziali, è costituita dal "principio della corrispondenza di polarità" (Proctor & Cho, 2006). Secondo questo principio molte dimensioni concettuali presentano opposti binari, come "alto" vs. "basso" o "destra" vs. "sinistra". Questi opposti non sono sempre simmetrici; ad esempio, chiediamo "quanto è alta una persona" piuttosto che "quanto è bassa".

Sulla base di questa asimmetria dimensionale, il principio della corrispondenza di polarità afferma che, se la polarità della dimensione della risposta e quella della dimensione dello stimolo coincidono, l'elaborazione è facilitata. Applicato all'effetto SNARC, ciò implica che numeri grandi, associati a destra, e numeri piccoli, associati a sinistra, condividono la stessa polarità, rendendo l'elaborazione più rapida. Santens e Gevers (2008) hanno suggerito che lo spazio a destra e i numeri

grandi sono considerati più “polari”, mentre lo spazio a sinistra e i numeri piccoli lo sono meno.

Lo spazio di destra è considerato più polare perché l’orientamento a destra è più frequente nella popolazione a causa della predominanza della destrimanità. Questa prevalenza influenzerebbe la nostra rappresentazione mentale dello spazio, facendo sì che la destra venga percepita come il valore “predefinito” o “non marcato” (cioè più comune e immediato) e, quindi, associato alla polarità positiva, mentre la sinistra sia considerata il valore marcato, associato alla polarità negativa (Roettger & Domahs, 2015).

Il principio della corrispondenza di polarità si estende a tutte e tre le dimensioni spaziali (orizzontale, verticale, sagittale; Santens & Gevers, 2008). Per l’asse orizzontale (destra/sinistra) la destra è più polare. Di conseguenza, l’elaborazione è più rapida quando la destra è associata a numeri grandi. Per l’asse verticale (alto/basso) l’alto è più polare e, dunque, l’elaborazione è più rapida quando l’alto è associato a numeri grandi. Per l’asse sagittale (vicino/lontano) il lontano è più polare. L’elaborazione, quindi, è più rapida quando il lontano è associato a numeri grandi (Santens & Gevers, 2008). Tuttavia, il principio di corrispondenza di polarità presenta un limite nello spiegare gli effetti SNARC perché è applicabile solo in presenza di risposta binaria, mentre non è sempre possibile adottarlo nei compiti che coinvolgono mappature spaziali.

1.6. Seconda ipotesi alternativa: la memoria di lavoro

Un’ulteriore ipotesi alternativa rispetto all’idea tradizionale, secondo cui l’effetto SNARC dipenderebbe dalla linea numerica mentale, è quella che coinvolge il ruolo della memoria di lavoro. In questa teoria, proposta da Abrahamse et al. (2016), è stato suggerito che l’effetto SNARC sia, in particolare, legato alla memoria di lavoro verbale, dove i numeri sono gestiti come una sequenza di elementi ordinati, al pari di una lista in cui ogni numero occupa una posizione specifica. L’effetto SNARC, quindi, potrebbe derivare dai cosiddetti “marcatori di posizione”. Secondo questi marcatori, quando ricordiamo o manipoliamo i numeri nella memoria di lavoro, assegniamo loro inconsciamente una “posizione” spaziale (ad es. la sinistra per i numeri piccoli e la destra per quelli grandi; Abrahamse et al., 2016).

Rasoulzadeh et al. (2021) hanno scoperto, tramite l'uso dell'elettroencefalografia, che per recuperare le informazioni dalla memoria di lavoro si verificano spostamenti orizzontali dell'attenzione nello spazio mentale. Questo significa che, per trovare la posizione di un numero, l'encefalo potrebbe simulare un movimento da sinistra a destra. Questa spiegazione funziona bene per l'effetto SNARC sull'asse orizzontale (sinistra/destra), ma non riesce a spiegare gli effetti sull'asse verticale e su quello sagittale. In sintesi, la teoria della memoria di lavoro suggerisce che l'effetto SNARC non dipenda da una linea numerica mentale fissa nella memoria a lungo termine, ma piuttosto dal modo in cui l'encefalo organizza e recupera i numeri nella memoria di lavoro, trattandoli come una sequenza ordinata (Abrahamse et al., 2016).

1.7. Lo studio di Aleotti et al. (2020)

Lo studio condotto da Aleotti et al. (2020) ha rappresentato un passo ulteriore nell'analisi delle SNA tridimensionali. Fino a quel momento la rappresentazione spaziale dei numeri con evidenze consistenti era quella della "linea numerica mentale". Nella maggior parte degli studi sull'effetto SNARC, i tre assi cartesiani erano sempre stati testati separatamente. Un passo interessante nello studio della rappresentazione spaziale dei numeri è arrivato con le SNA multiple. Alcuni studi hanno tentato di considerare le SNA sia orizzontali sia verticali, riportando un effetto SNARC simile su entrambi gli assi (Schwarz & Keus, 2004). Altri studi invece hanno riportato un effetto SNARC più forte sull'asse verticale rispetto all'asse orizzontale (Winter & Matlock, 2013; Wiemers et al., 2014). Inoltre, alcune prove sperimentali hanno cercato di indagare una possibile interazione tra assi, combinando assi orizzontali e verticali (Gevers et al, 2006, Holmes & Lourenco, 2012; Hesse & Bremmer, 2017).

Gevers et al. (2006) hanno utilizzato mappature di risposte diagonali, tuttavia, la disposizione dei pulsanti di risposta sulla tastiera utilizzata dai partecipanti non corrispondeva alle posizioni giù/su, bensì a quelle vicino/lontano. I risultati hanno riportato che l'effetto SNARC si manifestava solo quando entrambi gli assi erano compatibili (sinistra-giù, destra-su). Bisogna considerare, però, che l'asse testato nell'esperimento non era quello verticale, bensì l'asse sagittale.

Nel complesso, seppur alcuni studi abbiano dato evidenza dell'interazione degli effetti SNARC tra gli assi cartesiani attraverso mappature di risposta diagonali, queste ultime derivavano solo dall'unione di due soli dei tre assi cartesiani. Tale

frammentazione metodologica aveva lasciato aperta una domanda importante circa la natura delle SNA: se i tre assi siano davvero indipendenti tra loro o esista una struttura più complessa che li integri.

Lo scopo di Aleotti et al. (2020) è stato quello di indagare, attraverso un compito di giudizio di parità, se gli effetti SNARC orizzontali, verticali e sagittali fossero equivalenti o se un asse risultasse cognitivamente dominante rispetto agli altri. Le ipotesi formulate da Aleotti et al. (2020), per indagare il ruolo di ciascun asse, sono state tre: l'ipotesi di dominanza, l'ipotesi di indipendenza e l'ipotesi di traslazione.

Secondo l'ipotesi di dominanza, se una delle tre SNA lungo gli assi fosse significativamente più dominante, allora si sarebbe osservata la presenza dell'effetto SNARC più forte suscitato da un asse rispetto agli altri due. Dunque, la media dei TR non sarebbe stata significativamente diversa tra gli assi, ma l'effetto SNARC sarebbe stato significativamente più forte in un asse rispetto agli altri due.

In base all'ipotesi di indipendenza, se le tre associazioni spazio-numeriche lungo gli assi fossero cognitivamente indipendenti, si sarebbe osservata la presenza di tre effetti SNARC (orizzontale, verticale e sagittale) ugualmente forti. Dunque, la media dei TR non sarebbe stata significativamente diversa tra i tre assi. La conferma di questa ipotesi sarebbe stata la prova dell'esistenza di tre linee numeriche mentali indipendenti, per ciascun asse.

Secondo l'ipotesi di traslazione, infine, se una delle tre SNA lungo gli assi guidasse le altre due, si sarebbe osservato un processo di traslazione degli altri due assi verso quello principale. Dunque, la media dei TR sarebbe stata più bassa per l'asse principale rispetto agli altri due. Tuttavia, la forza degli effetti SNARC lungo i tre assi non sarebbe stata diversa tra i tre assi.

Per indagare queste ipotesi, Aleotti et al. (2020) hanno creato un esperimento nel quale i partecipanti erano chiamati a rispondere a stimoli numerici attraverso compiti che richiedevano l'utilizzo di tasti lateralizzati. Nello specifico, sono state utilizzate otto cifre arabe (numeri piccoli: 1, 2, 3, 4; numeri grandi: 6, 7, 8, 9) che comparivano una alla volta al centro di uno schermo, per evitare risposte automatiche in corrispondenza dei tasti lateralizzati.

Le risposte dei partecipanti sono state raccolte attraverso una pulsantiera, creata ad hoc per l'esperimento, composta da sei pulsanti su una box costituita da tre barre di plastica ortogonali (una orizzontale, una verticale e una sagittale), incro-

ciate al centro (Figura 1). Ogni estremità delle barre presentava un pulsante di risposta. Un cuscinetto di feltro è stato applicato sui pulsanti destro, superiore e lontano. Gli altri tre pulsanti, invece, ne erano privi. Questa scelta, di denominare “pulsanti con il feltro” e “pulsanti lisci”, era necessaria per evitare di fare espliciti riferimenti ai lati degli assi (ad es. pulsante destro, superiore, lontano).

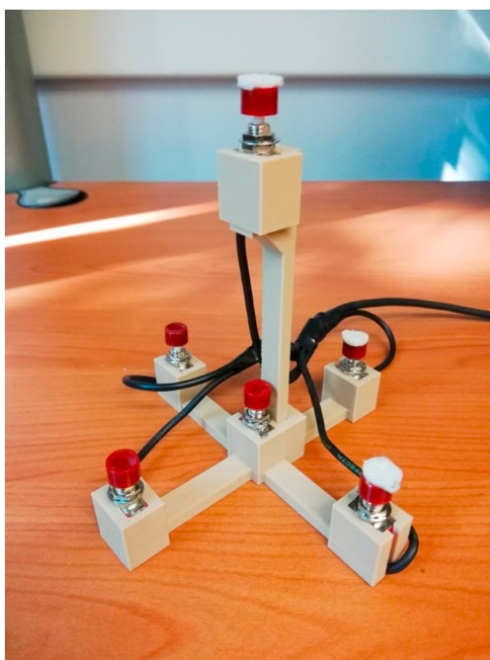


Figura 1. *Pulsantiera delle risposte dell'esperimento di Aleotti et al. (2020).*

A tutti i partecipanti sono state somministrate tre sessioni sperimentali, una per ogni asse (orizzontale, verticale, sagittale). Ogni sessione era divisa in due blocchi. Nel Blocco 1, i partecipanti dovevano premere il pulsante con il feltro quando apparivano i numeri arabi dispari, mentre dovevano premere il pulsante liscio quando apparivano i numeri arabi pari. Nel Blocco 2, i partecipanti dovevano premere il pulsante con il feltro quando apparivano i numeri arabi pari, mentre dovevano premere il pulsante liscio quando apparivano i numeri arabi dispari. Aleotti et al. (2020) hanno dunque indagato l'effetto di compatibilità tra i tre assi e l'effetto SNARC, ipotizzando una condizione di compatibilità: pulsante inferiore, sinistro o vicino e numeri piccoli; pulsante superiore, destro o lontano e numeri grandi. Infine, era stata ipotizzata una di incompatibilità (pulsante inferiore, sinistro o vicino e numeri grandi; pulsante superiore, destro o lontano e numeri piccoli).

Secondo i risultati di Aleotti et al. (2020), l'ipotesi di dominanza non è stata supportata. Infatti, non sono state rilevate differenze nella forza dell'effetto SNARC tra gli assi. Anche l'ipotesi di traslazione non è stata supportata dai risultati, i quali, invece, hanno suggerito una velocità di accesso alle SNA uguale per tutti e tre gli assi. L'ipotesi di indipendenza, invece, è stata confermata. Infatti, i risultati hanno suggerito l'esistenza di tre linee numeriche mentali indipendenti e ugualmente forti, supportate dalla presenza di un effetto SNARC indipendente, su ciascun asse cartesiano (orizzontale, verticale, sagittale).

L'interpretazione dei risultati ottenuti, nello studio di Aleotti et al. (2020), ha permesso di superare il concetto tradizionale di un'unica linea numerica mentale orientata da sinistra a destra. Infatti i suddetti risultati hanno consentito di aspirare a una teoria più ampia e articolata di spazio mentale tridimensionale dei numeri. Questa idea era già stata proposta per la prima volta da Schwarz e Keus (2004) con il concetto di mappa dei numeri. Nel loro studio Schwarz e Keus (2004) hanno cercato di comparare l'effetto SNARC con i movimenti oculari e con le risposte manuali non solo lungo la linea numerica mentale, ma anche lungo l'asse verticale. Grazie a questo approfondimento, hanno dimostrato che l'effetto SNARC non dipendeva solo da associazioni motorie apprese, ma compariva anche mediante i movimenti oculari verso destra e verso sinistra. Oltre a questo, gli autori hanno verificato anche l'esistenza di un effetto SNARC rilevato attraverso movimenti oculari in verticale. A partire da questi risultati, Schwarz e Keus (2004) hanno concluso che la rappresentazione mentale dei numeri era più complessa di una semplice linea mentale, configurandola piuttosto sottoforma di una mappa numerica bidimensionale.

1.8. Lo studio di Aleotti et al. (2023)

Aleotti et al. (2023) hanno esplorato in dettaglio la natura delle possibili interazioni tra i tre assi spaziali. Mentre Aleotti et al. (2020) avevano suggerito una relativa indipendenza tra i tre assi (orizzontale, verticale, e sagittale), Aleotti et al. (2023) hanno indagato se i tre assi potessero interagire tra loro, dando origine a piani spaziali complessi. Per verificare questa ipotesi, Aleotti et al. hanno introdotto una configurazione sperimentale che non solo testava le associazioni lungo i tre assi, ma esaminava anche la loro combinazione, al fine di ottenere quattro mappature di risposta diagonali: Piano 1, Piano 2, Piano 3, Piano 4.

Aleotti et al. (2023) hanno utilizzato una pulsantiera di risposta creata ad hoc che riproponesse l'idea della tridimensionalità. Essa era costituita da otto pulsanti che erano collocati ai vertici di un cubo virtuale (Figura 2). La posizione spaziale di ciascun pulsante risultava dalla combinazione simultanea dei tre assi cartesiani (destra/sinistra, alto/basso e vicino/lontano). Ogni Piano aveva due pulsanti di risposta situati in due vertici opposti della casella di risposta. Ogni Piano aveva un pulsante con feltro all'estremità destra e un pulsante liscio all'estremità sinistra (Figura 2). Gli stimoli utilizzati nell'esperimento erano quattro cifre arabe (numeri piccoli: 2, 3; numeri grandi: 7, 8) che apparivano una alla volta. Gli stimoli numerici venivano presentati in bianco al centro di uno schermo nero (Aleotti et al., 2023).

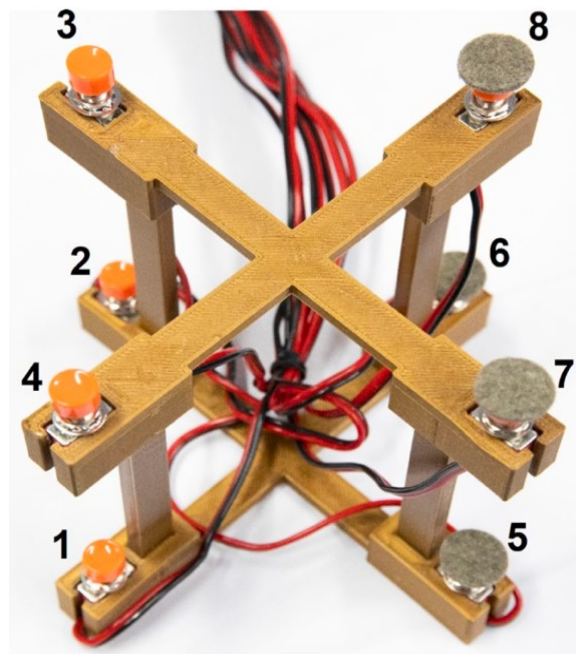


Figura 2. La pulsantiera dell'esperimento di Aleotti et al. (2023).

Tali mappature diagonali delle risposte sono state ottenute dalla combinazione di ciascun lato dell'asse orizzontale, verticale e sagittale. Sul Piano 1, lo SNARC risultava compatibile con tutti e tre gli assi (Figura 3, A). Sul Piano 2, lo SNARC risultava compatibile solo sull'asse orizzontale e verticale, ma non sagittale (Figura 3, B). Sul Piano 3, lo SNARC risultava compatibile solo sull'asse orizzontale (Figura 3, C). Infine, sul Piano 4, lo SNARC risultava compatibile sull'asse orizzontale e sagittale, ma non verticale (Figura 3, D).

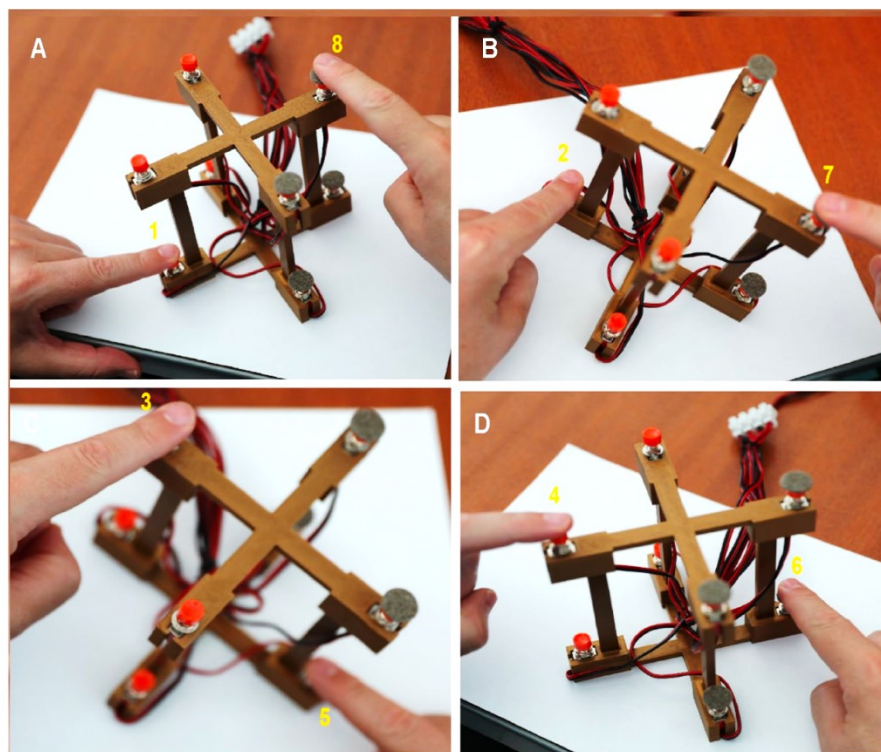


Figura 3. Assegnazione della mano di risposta per ogni mappa di risposta diagonale.

L'esperimento di Aleotti et al. (2023) era composto da quattro sessioni sperimentali, una per ogni mappatura di risposta (Sessione 1-Piano 1, Sessione 2-Piano 2, Sessione 3-Piano 3, Sessione 4-Piano 4). Metà dei partecipanti ha iniziato l'esperimento dalla Sessione 1 ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$), mentre l'altra metà ha cominciato dalla Sessione 4 ($4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$). Prima di iniziare, lo sperimentatore ha indicato ai partecipanti su quale pulsante liscio o col feltro porre l'indice destro e sinistro. I partecipanti dovevano stabilire se la cifra che veniva loro presentata fosse pari o dispari, premendo uno dei due pulsanti di risposta assegnati. In ogni sessione i partecipanti hanno eseguito il compito in due blocchi diversi, cioè cambiando l'assegnazione dei pulsanti di risposta. Nel Blocco 1, i partecipanti dovevano premere il pulsante liscio per i numeri pari e quello col feltro per i numeri dispari. Nel Blocco 2, invece, avveniva il contrario.

I risultati di Aleotti et al. (2023) hanno mostrato che i tre assi possono interagire durante l'elaborazione dei numeri e delle grandezze, e che per ottenere un effetto SNARC combinato le risposte devono essere SNARC-compatibili almeno su due assi cartesiani (numero piccolo in basso a sinistra). Inoltre, più era alto il numero di

assi cartesiani compatibili, più forte era l'effetto SNARC (Aleotti et al. 2023). In particolare, l'effetto SNARC è stato riscontrato sul Piano 1, 2 e 4, ma non lungo il Piano 3. Infatti, sul Piano 3 le mappe di risposta erano compatibili con lo SNARC solo sull'asse orizzontale, mentre sul Piano 1 le mappe di risposta erano compatibili lungo tutti e tre gli assi cartesiani.

I risultati di Aleotti et al. (2023) potrebbero essere considerati come la prova di uno spazio numerico mentale tridimensionale condiviso, in cui la grandezza dei numeri può essere rappresentata sia lungo ciascun singolo asse cartesiano, cioè come tre linee mentali numeriche indipendenti (Aleotti et al., 2020), sia lungo assi cartesiani combinati diagonalmente. Tuttavia, nello studio di Aleotti et al. (2023) i risultati mostrano un limite. Infatti, essendo stati utilizzati dei tasti di risposta lateralizzati (pulsanti allineati orizzontalmente, verticalmente e sagittalmente), non è stato possibile distinguere se l'interazione tra SNA avvenga solo a livello di selezione della risposta o anche a livello semantico.

1.8.1. Lo studio di Basso Moro et al. (2018)

Alcuni anni prima delle ricerche di Aleotti et al. (2020, 2023), Basso Moro et al. (2018) hanno cercato di capire meglio l'origine dell'effetto SNARC. C'erano due teorie principali per spiegare questo effetto. La prima suggeriva che l'effetto SNARC derivasse dalla nostra rappresentazione mentale dei numeri nello spazio, come se li immaginassimo disposti lungo una linea orizzontale. In base a questa ipotesi, l'effetto SNARC nascerebbe a livello semantico e, dunque, quando una persona vede un numero, il suo encefalo lo posiziona automaticamente su una linea mentale associandolo a sinistra (numeri piccoli) o a destra (numeri grandi). La seconda teoria, invece, sosteneva che l'effetto SNARC nascesse al livello della selezione della risposta e che, dunque, l'associazione spazio-numerica avvenisse più tardi, quando la persona deve decidere con quale mano rispondere.

Per testare queste ipotesi è stato necessario considerare le possibili combinazioni additive e interattive tra l'effetto SNARC, l'effetto distanza e il costo di commutazione. Se gli effetti sperimentali si sommarono, ma non si influenzavano a vicenda, erano considerati additivi e guidati, dunque, da processi cognitivi separati e distinti. Questo supporterebbe l'idea che l'effetto SNARC non dipenda solo dalla selezione della risposta, ma abbia anche una componente semantica. Se, invece, gli effetti sperimentali si influenzavano a vicenda, allora erano considerati interattivi

e guidati, quindi, da processi cognitivi relati. Dunque, l'effetto SNARC potrebbe apparire più forte o più debole a seconda di quanto la distanza numerica è piccola o grande.

Basso Moro et al. (2018) hanno presentato ai loro partecipanti i numeri da 1 a 9 (escludendo il 5) e hanno chiesto loro di confrontarli con il numero 5. Se il numero fosse stato più piccolo di 5, i partecipanti avrebbero dovuto premere un tasto sulla sinistra; se fosse stato più grande, avrebbero dovuto premere un tasto sulla destra. Tuttavia, Basso Moro et al. (2018) introdussero una variazione: il colore dello sfondo cambiava la regola. Se lo sfondo era giallo, i partecipanti seguivano le regole standard. Se, invece, lo sfondo era blu, le regole si invertivano e, quindi, i partecipanti dovevano premere il tasto opposto. Come previsto, cambiare regole da un momento all'altro rallentava la risposta, un fenomeno noto come "costo di commutazione".

Basso Moro et al. (2018) hanno osservato che i partecipanti erano più lenti a rispondere quando i numeri erano vicini tra loro, rispetto a quando erano molto diversi. Questo è chiamato "effetto di distanza numerica" e riflette il fatto che distinguere tra numeri vicini richiede più tempo e più elaborazione mentale. Tuttavia, il risultato più interessante riguardava proprio l'effetto SNARC (Basso Moro et al., 2018). Infatti, quando i numeri erano molto diversi tra loro, l'effetto SNARC rimaneva stabile indipendentemente dai TR. Invece, quando i numeri erano vicini, l'effetto SNARC diventava più evidente nei TR più lunghi. In altre parole, più tempo impiegavano i partecipanti a elaborare il numero, più forte risultava l'effetto SNARC.

Questi risultati suggeriscono che l'effetto SNARC non dipende solo dal processo di scelta della risposta, ma da una combinazione di fattori. In altre parole, lo SNARC dipenderebbe sia dalla nostra rappresentazione mentale dello spazio numerico, sia dal modo in cui elaboriamo i numeri in base al contesto. Quando i numeri sono molto vicini, il nostro encefalo ha bisogno di più tempo per processarli, e questo rende più evidente l'influenza della linea mentale dei numeri. Al contrario, quando i numeri sono molto distanti, non serve un'elaborazione così dettagliata e, quindi, l'effetto rimane più moderato. È importante ribadire che questi risultati dimostrano che i due modelli (livello semantico e di selezione della risposta) non dovrebbero essere considerati come reciprocamente esclusivi, ma entrambi in grado di garantire la presenza dell'effetto SNARC.

1.9. Le SNA in un ambiente di realtà immersiva: ipotesi di lavoro

Il nostro scopo, nel presente studio, era verificare se le SNA possono essere osservate senza risposte lateralizzate. A tale scopo, abbiamo indagato le SNA in un ambiente di realtà immersiva, al fine di testare se le SNA tridimensionali emergerebbero anche in assenza di tasti lateralizzati. Infatti, abbiamo testato l'ipotesi che i tre assi cartesiani possano interagire anche a livello semantico, lateralizzando la posizione dei numeri target sullo schermo, ma mantenendo il pulsante di risposta fisso in una posizione centrale. Abbiamo ipotizzato che se le molteplici SNA interagiscono solo a livello di selezione della risposta, allora l'interazione tra i tre assi cartesiani dovrebbe scomparire. Al contrario, se le molteplici SNA interagiscono (anche) a livello semantico, allora l'interazione dovrebbe essere osservata.

L'interazione degli assi cartesiani anche nel nostro studio, come in quello di Aleotti et al. (2023), è stata indagata attraverso le quattro mappature diagonali (Piano 1, Piano 2, Piano 3, Piano 4), con la differenza che nel nostro studio non sono state mappate le risposte, bensì i numeri nello spazio. Sul Piano 1, lo SNARC risultava compatibile con tutti e tre gli assi. Sul Piano 2, lo SNARC risultava compatibile solo sull'asse orizzontale e verticale ma non sagittale. Sul Piano 3, lo SNARC risultava compatibile solo sull'asse orizzontale. Infine, sul Piano 4, lo SNARC risultava compatibile sull'asse orizzontale e sagittale ma non verticale (Tabella 1).

Tabella 1. Compatibilità tra SNA e assi cartesiani nei Piani sperimentali

Piano 1			Piano 2		Piano 3		Piano 4	
	Spazio sinistro basso vicino	Spazio destro alto lontano	Spazio sinistro basso lontano	Spazio destro alto vicino	Spazio sinistro alto lontano	Spazio destro basso vicino	Spazio sinistro alto vicino	Spazio destro basso lontano
Numeri piccoli								
Orizzontale	+	-	+	-	+	-	+	-
Verticale	+	-	+	-	-	+	-	+
Sagittale	+	-	-	+	-	+	+	-
Numeri grandi								
Orizzontale	-	+	-	+	-	+	-	+
Verticale	-	+	-	+	+	-	+	-
Sagittale	-	+	+	-	+	-	-	+

Legenda: "+": SNA-asse Cartesiano compatibile; "-": SNA-asse Cartesiano incompatibile

Scendendo maggiormente nel dettaglio, abbiamo inteso indagare le seguenti ipotesi:

1. Se solo gli assi orizzontali e verticali interagivano, allora bisognava aspettarsi una SNA significativa suscitata dal Piano 1 e dal Piano 2, ma nessuna SNA suscitata dal Piano 3 e dal Piano 4. La SNA poteva anche essere presente in tutti i Piani. Tuttavia, se solo gli assi orizzontali e verticali interagivano, l'*effect size* della SNA prodotta nella combinazione del Piano 1 e Piano 2 doveva essere maggiore dell'*effect size* della SNA suscitata dalla combinazione del Piano 3 e 4.

2. Se solo gli assi orizzontali e sagittali interagivano, allora bisognava aspettarsi una SNA significativa suscitata dal Piano 1 e dal Piano 4, ma nessuna SNA suscitata dal Piano 2 e 3. La SNA poteva anche essere presente in tutti i Piani. Tuttavia, se solo gli assi orizzontali e verticali interagivano, l'*effect size* della SNA prodotto nella combinazione del Piano 1 e del Piano 4, doveva essere maggiore dell'*effect size* della SNA suscitata dalla combinazione del Piano 2 e 3.

3. Se solo gli assi verticali e sagittali interagivano, allora bisognava aspettarsi una SNA significativa suscitata solo dal Piano 1. Lo stesso schema di risultati poteva essere osservato anche quando i tre assi interagivano.

4. Se solo una specifica combinazione dei tre assi cartesiani generava una SNA, bisognava aspettarsi l'effetto SNA solo lungo quel Piano.

CAPITOLO 2:

METODO

2.1. Partecipanti

Sessanta partecipanti italiani sani hanno volontariamente preso parte a questo studio. Non è stato previsto alcun compenso o credito per la partecipazione allo studio. I partecipanti sono stati reclutati tra persone sane (ad es. studenti, colleghi, amici, conoscenti). Tutti i partecipanti dovevano avere un'acuità visiva normale o corretta a normale ed erano ingenui rispetto allo scopo dell'esperimento. Il numero di partecipanti (55) è stato definito a priori, mediante il software G*POWER 3 (*t*-test frequentista a un campione; potenza = .95; α = .05; dimensione dell'effetto = 0.45).

Per quanto riguarda la dimensione dell'effetto, sono state considerate le dimensioni dell'effetto più elevate ottenute nello studio di Dapor et al. (in preparazione) dall'ANOVA ($\eta^2_p = 0,097$), dai *t*-test a un campione ($d = 0,452$) e dai *t*-test a campioni appaiati ($d = -0,490$). Dunque, è stata decisa la dimensione del campione più alta stimata ($n = 55$), che era quella basata sull'*effect size* del *t*-test a un campione ($d = 0,452$). Ad essa sono stati aggiunti altri cinque partecipanti, per un campione finale di 60 (30 femmine e 30 maschi), per far fronte alla presenza di eventuali abbandoni, senza compromettere la potenza richiesta. Lo studio era stato approvato dal Comitato Etico della Ricerca Psicologica (AREA 17): <http://ethos.psy.unipd.it/>

2.2. Apparato e stimoli

2.2.1. Apparato

L'esperimento è stato somministrato presso il laboratorio CAVE del Dipartimento di Psicologia Generale dell'Università di Padova (Italia). Il laboratorio si componeva di due stanze attigue collegate in audio/video (C02-C06): la sala partecipanti (Figura 4) e la sala regia (Figura 5). Nella sala regia si trovava la Workstation Grafica contenente il generatore degli stimoli, l'impianto di elaborazione delle immagini, l'impianto di videoregistrazione e i controlli remoti della sala partecipanti.

La Workstation Grafica era così composta:

- Scheda Madre: ASUSTeK ROG MAXIMUS XI HERO (WI-FI);
- CPU: Intel Core I9-9900K @ 3.60GHz;

- Memoria: Kingston DDR4 32 GBytes;
- S.O.: Microsoft Windows 10 Professional (x64) Version 22H2, DirectX 12.0;
- Scheda Grafica: NVIDIA GeForce RTX 2080 TI, 11GBytes, configurazione PhysX con Surround di 3 uscite video per una risoluzione di 5760 x 1080 a 60Hz.

Il processore video digitale per fusione e deformazione M-FRAME PRO3 processava i segnali video della Workstation per produrre la deformazione necessaria alla corretta visione delle immagini proiettate sullo schermo curvo. Nella sala partecipanti, l'impianto era composto da tre videoproiettori EPSON EB-L1050 con caratteristiche tecniche migliorative per garantire la proiezione su superficie curva e l'alta definizione e contrasto dell'immagine. I proiettori avevano un pannello WUXGA, 1920 x 1200, 16:10 Alta definizione 4K *enhancement* con Rapporto di Contrasto Over 2.500.000:1, sorgente luminosa Full Laser, ottica ELPLX01 ULTRA SHORT con regolazione zero offset per spostamento e taratura immagine al millimetro ed elettronica e software di *warping* per adattamento a superficie curva.

I diffusori sono dispositivi che convertono il segnale elettrico audio in onde sonore, permettendo così la riproduzione del suono. Essi sono stati installati a parete in modo da creare l'effetto surround (5.1), un sistema di audio spaziale che avvolge l'ascoltatore con suoni provenienti da diverse direzioni, migliorando l'esperienza di ascolto. I diffusori erano, dunque, configurati per offrire un'esperienza audio immersiva, rendendo l'audio parte integrante dell'ambiente in cui si trovava l'ascoltatore. Per le riprese video erano presenti tre videocamere PTZ con illuminatori IR per riprese con scarsa luminosità, più una quarta mobile. Tutte avevano zoom e fuoco remotati e controllabili da regia per ottimizzare il dettaglio o il soggetto di ripresa. La ripresa audio era gestita da tre microfoni direttivi orientati. Infine, i TR dei partecipanti sono stati raccolti tramite una response box (Figura 6).



Figura 4. Sala partecipanti a 360°.



Figura 5. Sala regia a 360°.

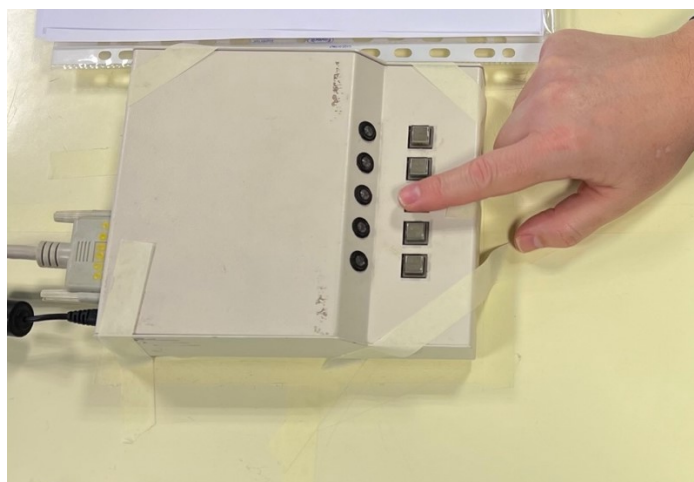


Figura 6. Response box e posizione del dito.

2.2.2. Stimoli

Gli stimoli visivi dell'esperimento sono stati generati con intelligenza artificiale, presentati con Opensesame 3.3.14 e proiettati su un telo curvo con risoluzione 6144 x 1080 px. Gli stimoli consistevano nella figura di un corridoio che fungeva da sfondo per creare l'ambiente 3D simulato, in una croce di fissazione bianca visualizzata al centro di un quadrato nero posizionato al centro del corridoio con una durata tra i 350-500 ms (coordinate del quadrato: $h = 320$, $w = 320$, $x = -160$, $y = -82$; coordinate della croce di fissazione: $x = 0$; $y = 78$), e, infine, nella presentazione dei target numerici (cifre arabe utilizzate: 2, 3, 7, 8) la cui grandezza numerica poteva essere relativamente piccola (2 e 3) o relativamente grande (7 e 8). Il colore scelto per le cifre arabe è stato il rosso in modo da distinguerle dallo sfondo.

Le cifre arabe sono state visualizzate con un carattere Arial (dimensioni: 50 o 100), a seconda della posizione spaziale occupata da ciascuna cifra araba. Più precisamente, è stato usato un carattere 50 per le posizioni spaziali 2, 3, 5 e 8 (si veda sotto) e un carattere 100 per le posizioni spaziali 1, 4, 6 e 7 (si veda sotto). Ciascuno dei quattro numeri target (2, 3, 7 e 8) appariva casualmente in una qualsiasi delle otto posizioni spaziali, uno alla volta, in modo da creare un totale di 32 condizioni.

Gli stimoli sono stati proiettati su uno schermo unico di proiezione curvato a 180° con raggio di 370 cm con prosecuzione ai lati per coprire lo spazio parete oltre i 180° del semicerchio di 150 cm per lato e con tela microforata che permetteva la trasparenza acustica. Lo schermo aveva un'altezza di 210 cm ed era sollevato di 20 cm da terra. La superficie totale di proiezione era di circa 18 m^2 . Ogni posizione spaziale aveva una propria combinazione di coordinate spaziali, come segue:

- Posizione spaziale 1 (sinistra-giù-vicino): $x = -272$; $y = 464$; $z = 0$
- Posizione spaziale 2 (sinistra-giù-lontano): $x = -64$; $y = 144$; $z = 0$
- Posizione spaziale 3 (sinistra-su-lontano): $x = -64$; $y = -48$; $z = 0$
- Posizione spaziale 4 (sinistra-su-vicino): $x = -272$; $y = -272$; $z = 0$
- Posizione spaziale 5 (destra-giù-lontano): $x = 64$; $y = 144$; $z = 0$
- Posizione spaziale 6 (destra-giù-vicino): $x = 272$; $y = 464$; $z = 0$
- Posizione spaziale 7 (destra-su-vicino): $x = 272$; $y = -272$; $z = 0$
- Posizione spaziale 8 (destra-su-lontano): $x = 64$; $y = -48$; $z = 0$

2.3. Procedura

I partecipanti si sedevano davanti a una scrivania (a 243 cm dallo schermo) collocata al centro della stanza e allineata al centro dello schermo. Al centro della scrivania era stata collocata la response box, il cui pulsante si trovava a 227,5 cm dallo schermo. Prima di iniziare l'esperimento, a ogni partecipante veniva chiesto di leggere, ad alta voce, il consenso informato pre-esperimento (Appendice). Una volta conclusa la prova sperimentale, veniva chiesto nuovamente ai partecipanti di leggere, ad alta voce, il consenso informato post-esperimento (Appendice).

Entrambi questi due documenti (consenso informato pre-esperimento e post-esperimento) venivano lasciati al partecipante ed entrambi contenevano una descrizione dell'esperimento e del suo scopo, il consenso alla partecipazione e al trattamento dei dati. Un terzo documento (Appendice), che conteneva l'informativa sulla finalità e la modalità di trattamento dei dati, veniva conservato dallo sperimentatore.

La seconda operazione, prima di iniziare l'esperimento, è stata quella di spiegare al partecipante che per rispondere agli stimoli doveva utilizzare l'indice della propria mano dominante (quella con cui si scrive), mentre l'altra mano andava tenuta sotto la scrivania. Inoltre, veniva chiesto al partecipante di mantenere una condotta composta ed evitare movimenti durante la prova sperimentale.

L'esperimento è stato condotto al buio, in modo che lo schermo fosse ben visibile. A questo punto iniziava la prova sperimentale, nella prima parte della quale (della durata di circa cinque minuti) lo sperimentatore chiedeva al partecipante le seguenti informazioni:

- Età;
- Sesso biologico;
- Scolarità (intendendo gli anni di istruzione compiuti senza considerare anni frequentati più di una volta o anni di fuori corso, o anni in corso non ancora finiti);
- Mano dominante;
- Presenza di deficit visivi e se fossero stati corretti.

Successivamente, i partecipanti sono stati istruiti a eseguire un compito di giudizio di parità (decidere se la cifra araba visualizzata era pari o dispari) in un paradigma *go/no-go*, premendo il più velocemente e accuratamente possibile il pulsante di risposta. Più precisamente, il compito era un paradigma *go/no-go* modificato. In altre parole, le condizioni di *no-go* non erano meno frequenti di quelle di *go*, come

richiederebbe un paradigma classico *go/no-go*. Al contrario, i numeri pari e dispari apparivano con la stessa frequenza, seguendo il principio di randomizzazione, usato anche per le posizioni spaziali in cui apparivano i numeri.

L'esperimento si componeva di due sessioni sperimentali, ciascuna composta da 320 trial; in totale, ogni partecipante ha eseguito 640 trial. Prima di ogni sessione sperimentale, i partecipanti hanno svolto otto trial di esercitazione (uno per ogni posizione spaziale) per familiarizzare con l'esperimento. La durata totale della prova sperimentale è stata di trenta minuti.

Nella Sessione 1, i partecipanti dovevano premere il pulsante di risposta (condizione *go*) quando la cifra araba presentata era pari, ma non dovevano premere il pulsante di risposta (condizione *no-go*) quando la cifra araba presentata era dispari. Nella Sessione 2, il compito era l'opposto (cifre dispari: condizione *go*; cifre pari: condizione *no-go*). Ogni sessione era stata suddivisa in due blocchi di 160 trial ciascuno (80 trial con numeri pari e 80 con numeri dispari). I due blocchi erano separati da una pausa di un minuto. L'ordine di presentazione delle due sessioni è stato controbalanciato tra i partecipanti. A metà dei partecipanti è stata somministrata prima la Sessione 1, seguita dalla Sessione 2, mentre all'altra metà dei partecipanti è stata somministrata prima la Sessione 2, seguita dalla Sessione 1.

Ogni prova iniziava con la presentazione di un corridoio che mostrava, al centro, un rettangolo nero con una croce di fissazione bianca centrale. Dopo un intervallo di tempo variabile di 350-500 ms, il quadrato nero e la croce di fissazione scomparivano. In seguito, il numero target (cioè una cifra araba) appariva in una delle otto posizioni spaziali per un tempo fisso di 500 ms. I TR sono stati registrati dall'inizio dello stimolo target per un tempo limite di 1000 ms (500 ms di presentazione del target + 500 ms del corridoio vuoto). Dopo 1200 ms dall'inizio dello stimolo target, iniziava un nuovo trial (Figura 7).

Ciascun trial (Figura 7), quindi, era composto da:

- Presentazione della croce di fissazione con un SOA (*Stimulus-Onset Asynchrony*) di 350-500 ms; il SOA era il tempo che intercorreva tra la comparsa del rettangolo con la croce di fissazione e il numero target, la cui variabilità aveva lo scopo di evitare una risposta automatica del partecipante;
- Presentazione del numero target (cifra araba; 500 ms);
- Presentazione del corridoio vuoto (500 ms);

- ITI (*Inter-Trial Interval*): 200 ms. L'ITI era l'intervallo temporale tra un trial e quello successivo. Anche l'ITI era costituito dal corridoio vuoto.



Figura 7. Esempio di un trial.

2.4. Disegno sperimentale

Il disegno sperimentale che è stato utilizzato era unifattoriale entro i partecipanti (*within-participants*). La variabile indipendente era rappresentata dalla cifra araba (quattro livelli: 2, 3, 7, 8) separatamente per ogni Piano (Piano 1, Piano 2, Piano 3, Piano 4). La variabile dipendente era la dTR (la differenza dei TR). Per ogni partecipante, per ogni Piano e per ogni cifra araba, è stata calcolata la differenza tra i TR dell'estremità destra del piano e i TR dell'estremità sinistra del Piano (dTR: TR estremità destra - TR estremità sinistra).

CAPITOLO 3:

RISULTATI

3.1. Analisi frequentiste

Abbiamo condotto le analisi frequentiste utilizzando sia IBM SPSS 24, sia JASP Team (2024, Version 0.18.3). Il tasso di errore (ossia risposte errate e omissioni) è stato del 16.8% del totale. Nessun partecipante è stato escluso, perché l'accuratezza di ciascun partecipante non è risultato inferiore a 2.5 *DS* rispetto alla media dell'accuratezza di tutti i partecipanti ($M = 83\%$; $DS = 0.122$). Di conseguenza, le analisi successive sono state condotte su tutti i 60 partecipanti. Sono stati esclusi, dalle analisi successive, i TR corretti, che risultavano più veloci o più lenti di 2.5 *DS*² rispetto alla media di ciascuna condizione e per ogni partecipante (ottenuti dalle combinazioni di target numerico/posizione spaziale). I TR eliminati erano l'1.22% del totale di tutti i trial corretti.

3.1.1. Regressione lineare singola

Per ciascun partecipante, è stata eseguita un'analisi di regressione lineare singola per misure ripetute (Metodo 3; Lorch & Myers, 1990), separatamente per ogni Piano (Piano 1, Piano 2, Piano 3 e Piano 4). La variabile indipendente era rappresentata dalle cifre arabe, mentre la variabile dipendente era la dTR. Si noti che l'effetto SNARC si manifesta con una pendenza negativa significativa (Fias et al., 1996). Per i numeri piccoli, le dTR positive indicavano risposte più veloci con la mano sinistra rispetto alla destra. Al contrario, per i numeri grandi, le dTR negative indicavano risposte più veloci con la mano destra rispetto alla sinistra. Le analisi descrittive sui coefficienti di regressione non standardizzati (beta) sono riportate nella Tabella 2 e nella Figura 8. I valori di asimmetria (*skewness*) e curtosi erano entro i valori di riferimento (-2/+2), suggerendo l'assenza di compromettenti violazioni della normalità.

² Le analisi statistiche sono state eseguite anche su un'accuratezza di 1.5 *DS* e sui punteggi superiori a 90%.

Tabella 2. Statistiche descrittive.

	Beta_Piano 1	Beta_Piano 2	Beta_Piano 3	Beta_Piano 4
Valide	60	60	60	60
<i>M</i>	-2.609	-2.242	3.226	-1.373
<i>ESM</i>	1.611	1.495	1.713	1.587
95% IC <i>M</i> superiore	0.615	0.750	6.654	1.802
95% IC <i>M</i> inferiore	-5.832	-5.235	-0.202	-4.548
<i>DS</i>	12.479	11.584	13.270	12.289
Asimmetria	-0.480	-0.308	-0.498	0.122
<i>ES</i> di asimmetria	0.309	0.309	0.309	0.309
Curtosi	0.582	-0.357	1.107	0.087
<i>ES</i> Curtosi	0.608	0.608	0.608	0.608
Minimum	-41.918	-28.235	-35.959	-29.652
Maximum	21.762	21.307	27.913	29.043

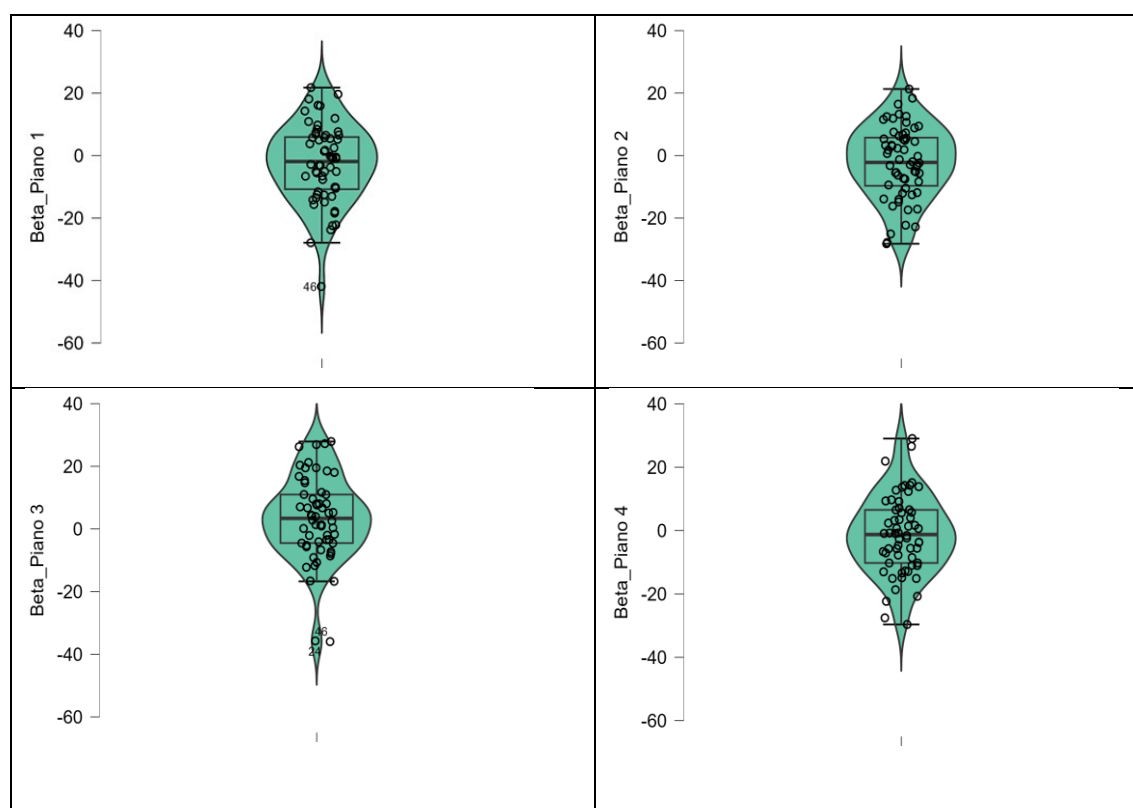


Figura 8. Box plot per ciascun Piano.

3.1.2. Analisi della Varianza (ANOVA)

I 60 beta ottenuti dall'analisi delle dTR di ciascun Piano (Piano 1, Piano 2, Piano 3 e Piano 4) sono stati sottoposti a un'ANOVA unifattoriale, a misure ripetute. La variabile indipendente era il Piano (quattro livelli: Piano 1, Piano 2, Piano 3, Piano

4), mentre la variabile dipendente erano i beta. L'effetto principale del Piano è risultato significativo, $F(3, 177) = 3.318$, $p < .021$, $\eta^2_p = 0.053$; Tabella 3), ma la dimensione dell'effetto (*effect size*) era piccola.

Tabella 3. ANOVA per misure ripetute.

Casi	Somma dei quadrati	gdl	M dei quadrati	F	p	η^2_p
Piano	1312.751	3	437.584	3.318	.021	0.053
Residui	23346.533	177	131.901			

Nota. Somma dei quadrati di Tipo III.

Test di Sfericità

	Mauchly W	Appros. X^2	gdl	p	Green-house-Geisser ϵ	Huynh-Feldt ϵ	Lower Bound ϵ
Piano	0.934	3.914	5	.562	0.956	1.000	0.333

3.1.3. T-test a campione unico

Per indagare la presenza dell'effetto SNARC, in ciascun Piano, sono stati condotti quattro *t*-test a campione unico versus 0 (assenza dell'effetto SNARC). Nessuno dei *t*-test è risultato significativo e la dimensione dell'effetto è stata minima.

Tabella 4. T-test a campione unico.

	<i>t</i>	gdl	<i>p</i>	Differenza <i>M</i>	95% IC per differenza <i>M</i>		<i>d</i> di Cohen	ES <i>d</i> di Cohen	95% IC per <i>d</i> di Cohen	
					Lower	Upper			Inferiore	Superiore
Beta_Piano 1	-1.619	59	.111	-2.609	-5.832	0.615	-0.209	0.131	-0.464	0.048
Beta_Piano 2	-1.499	59	.139	-2.242	-5.235	0.750	-0.194	0.130	-0.448	0.063
Beta_Piano 3	1.883	59	.065	3.226	-0.202	6.654	0.243	0.131	-0.015	0.499
Beta_Piano 4	-0.865	59	.390	-1.373	-4.548	1.802	-0.112	0.130	-0.365	0.143

Nota. Per il *t*-test di Student, la dimensione dell'effetto è data dal *d* di Cohen.

Nota. Per il *t*-test di Student, la stima della differenza di posizione è data dalla differenza media campionaria *d*.

Nota. Per il *t*-test di Student, l'ipotesi alternativa specifica che la media è diversa da 0.

Nota. T-test di Student.

3.1.4. Confronti a coppie (post-hoc)

Per esplorare ulteriormente la significatività emersa nell'ANOVA, abbiamo condotto dei confronti a coppie (*post-hoc*), tra i quattro Piani, corretti con il metodo di Bonferroni. L'unico confronto che è risultato significativo era quello tra Piano 1 e Piano 3 (Tabella 5).

Tabella 5. Confronti a coppie (*post-hoc*).

		Differenza <i>M</i>	<i>ES</i>	<i>t</i>	<i>d di Cohen</i>	<i>p</i>
Piano 1	Piano 2	-0.366	2.166	-0.169	-0.029	1.000
	Piano 3	-5.835	1.876	-3.111	-0.470	0.017
	Piano 4	-1.235	2.033	-0.608	-0.099	1.000
Piano 2	Piano 3	-5.468	2.315	-2.362	-0.440	0.129
	Piano 4	-0.869	2.191	-0.397	-0.070	1.000
Piano 3	Piano 4	4.599	1.970	2.334	0.370	0.138

Nota. *P-value* aggiustato per il confronto di una famiglia di 6.

3.2. Analisi Bayesiane

Sono state condotte le stesse analisi bayesiane come quelle frequentiste. Le analisi bayesiane hanno ampiamente confermato i risultati delle analisi frequentiste (Tabelle 6, 7, 8). L'unica eccezione era l'ANOVA, in cui il BF_{10} era molto basso (evidenza aneddotica a favore dell'ipotesi alternativa; Wagenmakers et al., 2018).

Tabella 6. ANOVA.

Modello comparato

Modelli	P(M)	P(M dati)	BF_M	BF_{10}	errore %
Modello nullo (incl. soggetto e pendenze casuali.)	0.500	0.404	0.678	1.000	
Piano	0.500	0.596	1.476	1.476	0.493

Nota. Tutti i modelli includono il soggetto e pendenze casuali per tutti i fattori a misure ripetute.

Tabella 7. T-test a campione unico.

	BF_{10}	error %
Beta_Plane1	0.483	0.038
Beta_Plane2	0.407	0.043
Beta_Plane3	0.737	0.029
Beta_Plane4	0.202	0.068

Nota. Per tutti i test, l'ipotesi alternativa specifica che la media della popolazione è diversa da 0.

Tabella 8. Confronti a coppie (post-hoc).

		Odds precedenti	Odds posteriori	BF_{10, U}	errore %
Piano 1	Piano 2	0.414	0.059	0.143	0.085
	Piano 3	0.414	4.324	10.438	1.929×10 ⁻⁷
	Piano 4	0.414	0.070	0.168	0.077
Piano 2	Piano 3	0.414	0.756	1.824	0.015
	Piano 4	0.414	0.063	0.152	0.082
Piano 3	Piano 4	0.414	0.713	1.721	0.015

Nota. Le odd posteriori sono state corrette per test multipli fissando a 0.5 la probabilità a priori che l'ipotesi nulla sia valida in tutte le comparazioni (Westfall et al., 1997). Le singole comparazioni si basano sul test t predefinito con una distribuzione a priori di Cauchy (0, $r = 1/\sqrt{2}$). La "U" nel fattore di Bayes indica che non è stato corretto.

CAPITOLO 4:

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

4.1. Riassunto del presente studio e delle ipotesi di lavoro

Il nostro intento, nel presente studio, era quello di approfondire la complessa relazione tra numero e spazio. Questa relazione, sin dal XVIII secolo, ha suscitato l'interesse di filosofi e scienziati e ha dato vita a una letteratura di stampo scientifico che ha reso possibile arrivare al punto in cui ci troviamo oggi. La nostra finalità era, dunque, indagare se le SNA potessero essere osservate senza risposte lateralizzate. A tale scopo abbiamo lateralizzato la posizione dei numeri nello spazio, per indagare le SNA in un ambiente di realtà immersiva.

Abbiamo testato l'interazione tra gli assi cartesiani (orizzontale, verticale e sagittale) per verificare se essi interagivano a livello semantico. A tale scopo, è stata lateralizzata la posizione dei numeri target sullo schermo ed è stato mantenuto il pulsante di risposta fisso in posizione centrale. Se le SNA emergessero solo a livello di selezione della risposta, allora l'interazione tra i tre assi cartesiani sarebbe dovuta scomparire in un ambiente senza risposte lateralizzate. Se, invece, le SNA interagissero anche a livello semantico, allora l'interazione tra i tre assi cartesiani avrebbe dovuto essere osservata anche senza risposte lateralizzate.

Ricapitolando, le ipotesi di lavoro formulate erano le seguenti:

- Se solo gli assi orizzontali e verticali interagivano, ci si aspettava una SNA significativa suscitata dal Piano 1 e dal Piano 2, ma nessuna SNA suscitata dal Piano 3 e dal Piano 4.
- Se solo gli assi orizzontali e sagittali interagivano, ci si aspettava una SNA significativa suscitata dal Piano 1 e dal Piano 4, ma nessuna SNA suscitata dal Piano 2 e 3.
- Se solo gli assi verticali e sagittali interagivano, ci si aspettava una SNA significativa suscitata solo dal Piano 1.
- Se solo una specifica combinazione dei tre assi cartesiani generava una SNA, ci si aspettava l'effetto SNA solo lungo quel Piano.

4.2. Riassunto dei risultati del presente studio

I risultati ottenuti dall'ANOVA a misure ripetute hanno evidenziato che l'effetto principale del Piano (che include Piano 1, Piano 2, Piano 3 e Piano 4) era significativo, anche se con una dimensione dell'effetto piccola. Per indagare nello specifico la presenza dell'effetto SNARC sui singoli Piani, abbiamo condotto dei *t*-test a campione unico, confrontando ciascuna media delle dTR del Piano con lo zero (assenza dell'effetto SNARC). Nessuno di questi confronti è risultato significativo. Questo suggerisce che non possiamo sostenere la presenza dell'effetto SNARC in alcun Piano. A questo punto, per approfondire la significatività globale emersa dall'ANOVA, abbiamo condotto i confronti a coppie *post-hoc*, corretti con Bonferroni, in modo da confrontare le medie di tutti i Piani tra di loro. L'unico confronto *post-hoc* significativo è stato quello tra Piano 1 e Piano 3 ($p = 0.017$).

Poiché prima di condurre l'esperimento non avevamo formulato ipotesi sulla eventualità che emergessero tali risultati, abbiamo provato a farlo a posteriori. La significatività tra Piano 1 e Piano 3 non può essere casuale, perché abbiamo fatto affidamento sul metodo Bonferroni che adotta una correzione statistica, utilizzata per controllare l'errore di Tipo I, finalizzata, cioè, a ridurre il rischio di ottenere un risultato significativo per puro caso. Probabilmente, dunque, questa significatività non ha a che fare con l'effetto SNARC direttamente, ma potrebbe derivare da diversi fattori.

La nostra opinione, in merito a questo risultato, è che la differenza è dovuta alla direzione di pendenza. Infatti, dalle statistiche descrittive è emersa una differenza importante di pendenza rilevata dal confronto della media della dTR dei due Piani (1 vs. 3). Infatti, questi ultimi hanno pendenza opposta: nel Piano 1 abbiamo rilevato una pendenza negativa, mentre nel Piano 3 abbiamo rilevato una pendenza positiva. Tuttavia, come già dichiarato precedentemente, non avendo postulato ipotesi a priori, questo dato non consente interpretazioni fondate, benché la sua evidenza potrebbe essere utilmente indagata in studi successivi.

Le analisi bayesiane hanno ampiamente confermato i risultati delle analisi frequentiste, tranne per l'ANOVA che nelle analisi bayesiane non era caratterizzata da evidenza a favore dell'ipotesi sperimentale. Infatti, l'effetto SNARC, che si manifesterebbe con una pendenza negativa significativa nella regressione lineare, non è stato confermato dai *t*-test a campione singolo.

4.3. Confronto con i risultati di studi precedenti

Considerati i risultati emersi nel presente studio, le ipotesi di lavoro, dunque, non sono state confermate, a differenza di altri studi precedenti (in particolare quelli di Aleotti et al., 2020, 2023, e di Basso Moro et al., 2018). Contrariamente a quanto ipotizzato, non è emersa nessuna SNA significativa su nessun Piano. A differenza, però, degli studi di Aleotti et al. (2020, 2023), nel presente studio abbiamo utilizzato un unico pulsante di risposta centrale, lateralizzando, invece, la posizione dei numeri sullo schermo. Questo potrebbe aver modificato il modo in cui i diversi assi cartesiani hanno interagito e potrebbe aver, dunque, compromesso l'espressione delle SNA tridimensionali; probabilmente, per questo motivo non sono state riscontrate nel nostro studio.

Aleotti et al. (2020, 2023) avevano suggerito l'esistenza di tre linee numeriche mentali indipendenti, ma interagenti, ipotesi supportata dalla presenza di un effetto SNARC indipendente su ciascun asse. Tuttavia, i nostri risultati si discostano da quelli ottenuti da Aleotti et al. (2020, 2023). Infatti, non abbiamo ottenuto alcun effetto SNARC su alcuno dei quattro Piani indagati.

Come già esaminato da Aleotti et al. (2023), abbiamo esplorato l'interazione tra gli assi attraverso mappature diagonali. Aleotti et al. (2023) hanno suggerito la presenza di un effetto SNARC combinato. I loro risultati hanno evidenziato che l'effetto SNARC era più forte quando le risposte erano SNARC-compatibili su almeno due assi cartesiani. Più assi erano compatibili, più ci si aspettava un effetto SNARC forte. Nel nostro studio, invece, questa compatibilità non si è tradotta in un effetto altrettanto evidente, né sui Piani con più assi compatibili, né sui Piani con meno assi compatibili, il che potrebbe essere dovuto alla diversa metodologia impiegata. Infatti, la mancanza di un effetto SNARC forte e consistente in tutti i Piani suggerisce che l'interazione semantica tra gli assi potrebbe non essere sufficiente a generare un effetto robusto in assenza di risposte lateralizzate. Dunque, l'interazione tra gli assi potrebbe essere più complessa e dipendere in maniera consistente dal contesto sperimentale.

Considerando lo studio di Basso Moro et al. (2018), i nostri risultati potrebbero essere interpretati alla luce della distinzione tra processi semantici e di selezione della risposta. Basso Moro et al. (2018) hanno suggerito che l'effetto SNARC dipendeva da combinazione di fattori semantici e di selezione della risposta. Nello studio

di Basso Moro et al. (2018), infatti, è emerso che i numeri piccoli venivano processati più rapidamente col pulsante sinistro e quelli grandi col pulsante destro. Se questa regola veniva invertita, si verificava il fenomeno già citato (Capitolo 1) di “costo di commutazione”, che afferiva alla componente di selezione della risposta.

La mancanza di risposte lateralizzate nel nostro paradigma potrebbe aver ridotto il contributo dei processi di selezione della risposta, rendendo meno evidente l'effetto SNARC. Sulla base dei nostri risultati si potrebbe, dunque, ipotizzare che, senza la lateralizzazione delle risposte, la componente semantica della rappresentazione mentale dei numeri non sia stata sufficiente a generare l'effetto SNARC su un Piano. Tuttavia, il fenomeno interessante dell'effetto SNARC che si evinceva nello studio di Basso Moro et al. (2018) riguardava il dilatarsi dei TR quando i numeri erano molto vicini tra loro. Questa è considerevole prova attendibile del supporto della linea numerica mentale, e dunque della componente semantica, per meglio processare i numeri vicini tra loro. Questo aspetto potrebbe essere approfondito e meglio considerato in futuro per monitorare la componente semantica.

4.4. Limiti del presente studio e proposte per studi futuri

Abbiamo provato a individuare le cause che possano spiegare la mancata rilevazione dell'effetto SNARC durante il nostro esperimento. Nel corso della prova sperimentale, l'utilizzo di un unico pulsante di risposta potrebbe aver ridotto la sensibilità del paradigma nel rilevare le SNA tridimensionali. Anche l'ambiente virtuale potrebbe aver introdotto elementi di distrazione che possono aver interferito con l'elaborazione dei numeri, così come è ipotizzabile che qualche aspetto tecnico del CAVE abbia influenzato l'andamento dell'esperimento rispetto a quanto ci si attendeva.

Un altro fattore potrebbe essere stato la lateralizzazione dei numeri sullo schermo che potrebbe aver iperstimolato l'elaborazione della cifra in periferia, rendendo ambiguo il compito. Quest'ultimo è un elemento da tenere in considerazione nell'analisi dei risultati. Infatti, questo è un dato nuovo rispetto agli studi precedenti (Aleotti et al., 2020, 2023), nei quali il numero appariva in posizione centrale, consentendo ai partecipanti di elaborarlo per la sua natura aritmetica, senza dover considerare anche la posizione spaziale in cui emergeva. Inoltre, se negli studi precedenti l'attenzione spaziale dei partecipanti era selettivamente rivolta al centro dello schermo, nel presente studio l'effetto sorpresa della posizione in cui sarebbe potuto

apparire il numero potrebbe aver influenzato il compito. Oltre a ciò, i numeri che nello schermo della realtà immersiva apparivano più in periferia, potrebbero non essere stati sempre percepiti chiaramente dai partecipanti, perché troppo lateralizzati. In futuro, si potrebbe riproporre lo stesso esperimento, ma monitorando i movimenti oculari attraverso l'ausilio di *eye tracking*, per aumentare il controllo sulle variabili inattese.

Anche le misure calcolate della distanza tra lo schermo e la postazione del partecipante potrebbero essere revisionate. Infatti, in eventuali studi futuri, potrebbe essere prevista una distanza ancora più elevata per permettere, a chi guarda lo schermo, una visione ampia che non presenti limiti nella visuale laterale. Un ulteriore elemento da evidenziare sono le impressioni comunicate immediatamente dopo l'esperimento dai partecipanti, la maggior parte dei quali riportava di sentirsi stanca e un po' disorientata dal *setting* della prova, come se la realtà immersiva di cui aveva appena fatto esperienza avesse generato sensazioni di confusione e insofferenza.

Un altro dato da considerare, emerso dopo lo svolgimento del compito sperimentale, è stata la difficoltà nel discriminare le cifre 3 e 8 quando esse apparivano sullo schermo. Questo potrebbe aver interferito sia sui TR, sia sulla percentuale di errore misurata, perché il compito di giudizio di parità potrebbe essere stato compromesso dall'incertezza nel riconoscere un numero pari piuttosto che uno dispari e viceversa. Un elemento, invece, che senz'altro non ha potuto compromettere l'esperimento è quello della numerosità campionaria. Essa, infatti è stata definita a priori in sessanta partecipanti che sono risultati più che sufficienti ai fini di ciò che ci si era prefissi di indagare.

Per superare questi limiti, studi futuri potrebbero condurre lo stesso esperimento utilizzando sì un contesto di realtà immersiva, ma recuperando la presenza di tasti lateralizzati poiché potrebbe darsi il caso che la rappresentazione semantica dei numeri non riesca ad emergere attraverso l'utilizzo di un solo tasto di risposta. Questo suggerisce che l'effetto di selezione della risposta sia necessario per far sì che si verifichi l'effetto SNARC. In alternativa, volendo provare a eseguire nuovamente un esperimento che abbia un unico tasto di risposta centrale, bisognerebbe fare attenzione alla scelta dei numeri (per evitare somiglianze nella loro forma) e alla distanza dei partecipanti dallo schermo, per ridurre variabili inattese. Si potrebbe, infine, anche riproporre il medesimo esperimento in un *setting* sperimentale

che preveda solo lo schermo di un computer, piuttosto che un ambiente di realtà immersiva che potrebbe aver comportato una dispersione dell'attenzione spaziale e del focus sul compito richiesto.

4.5. Conclusioni

Nonostante i risultati del presente studio non abbiano soddisfatto le ipotesi di partenza, continuare a indagare le SNA tridimensionali a livello semantico e a livello di selezione della risposta in un ambiente di realtà immersiva permetterebbe di scoprire il risvolto pratico delle SNA nella vita di tutti i giorni e nella quotidianità di tutti. Per esempio, capire come rappresentiamo i numeri nello spazio potrebbe aiutare a migliorare l'insegnamento della matematica. Visualizzare concetti matematici in uno spazio tridimensionale, infatti, potrebbe facilitare la comprensione di discipline come l'algebra e la geometria (Aleotti et al., 2020). Inoltre, poiché le SNA sono alterate in presenza di disturbi specifici dell'apprendimento (come, ad esempio, la discalculia), conoscere meglio tali associazioni potrebbe aiutare a sviluppare terapie riabilitative più efficaci. Si possono allenare, per esempio, i pazienti acalculici a recuperare la capacità di processare i numeri nello spazio, come avevano già affermato Basso Moro et al. (2018). Occorre anche considerare che le ricerche sulla rappresentazione spaziale dei numeri possono essere utili per comprendere meglio i disturbi neuropsicologici come il neglect spaziale e per sviluppare, a riguardo, strategie di riabilitazione più mirate (Zorzi et al, 2009).

Anche la realtà aumentata potrebbe ottenere dei vantaggi da una migliore comprensione delle SNA. Ad esempio, se sappiamo che le persone tendono a immaginare i numeri grandi in alto a destra, possiamo ottimizzare la disposizione delle informazioni nei display o progettare sistemi di navigazione più intuitivi. A riguardo, Hoffmann et al. (2014) hanno sostenuto che le SNA possono essere usate per ottimizzare le interfacce digitali e migliorare l'usabilità dei sistemi di realtà virtuale e aumentata. Infatti, comprendere come i numeri sono rappresentati mentalmente in uno spazio tridimensionale può migliorare il design di dispositivi che prevedano numeri disposti nello spazio, come cruscotti di auto, tastiere, leve del cambio, termostati, ascensori. Si potrebbe ottimizzare la disposizione di tasti e display numerici per facilitare l'interazione dell'utente, rendendo più intuitivo l'uso di tali dispositivi (Aleotti et al., 2020, 2023).

Le SNA tridimensionali potrebbero essere rilevanti anche per la memoria spaziale. Ad esempio, nei contesti in cui si usano mappe mentali, la disposizione dei numeri nello spazio potrebbe influenzare il modo in cui le persone elaborano e ricordano le informazioni. Fischer e Shaki (2018), per esempio, hanno esaminato come le SNA influenzino il processo decisionale e il modo in cui interpretiamo i numeri nel contesto quotidiano. Proprio in considerazione di tutte le possibili applicazioni, gli studi sull'effetto SNARC, all'interno delle SNA, sono fondamentali per integrare modelli teorici della cognizione numerica, di cui è auspicabile ampliare la conoscenza, prendendo anche in considerazione l'influenza di fattori culturali, linguistici e biologici sempre più variegati (Aleotti et al., 2023).

In conclusione, esplorare le SNA ci consente di avvicinarci sempre di più al complesso mondo della rappresentazione mentale dei numeri che, pur essendo parte di noi e generata dai nostri stessi processi cognitivi, cela tanti mondi sconosciuti e inesplorati, di cui però siamo spesso inconsapevolmente padroni e garanti. Kant diceva che *“la ragione umana [...] ha il destino particolare di essere tormentata da problemi che non può evitare, perché le sono posti dalla natura della stessa ragione, ma dei quali non può trovare la soluzione, perché oltrepassano ogni potere della ragione umana”* (Kant, 1781/1904). E come l'uomo si pone continuamente interrogativi a cui non sa dare risposta, così tante domande rimangono potenziali, senza che arrivino mai a conquistare nemmeno la consapevolezza, da parte della persona, di averle in sé.

Al di là dei benefici e dei risvolti pratici che studi futuri sulle SNA potrebbero produrre proseguendo l'indagine del presente studio e della letteratura sin qui sviluppata in questo ambito, rimane aperta la sfida più grande. Questa sfida consiste nello scoprire il perché di ciò che accade nella nostra mente: perché collochiamo i numeri nello spazio, in che modo lo facciamo, e se esiste un criterio riproducibile. La spinta a proseguire continuerà a essere sempre alimentata dalla curiosità e dal desiderio dell'uomo-scienziato di conoscere e apprendere.

BIBLIOGRAFIA

- Abrahamse, E., Van Dijck, J. P., & Fias, W. (2016). How does working memory enable number-induced spatial biases? *Frontiers in Psychology*, 7, 977. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00977>
- Aleotti, S., Di Girolamo, F., Massaccesi, S., & Priftis, K. (2020). Numbers around Descartes: A preregistered study on the three-dimensional SNARC effect. *Cognition*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.104111>
- Aleotti, S., Massaccesi, S., & Priftis, K. (2023). The SNARC effect: A preregistered study on the interaction of horizontal, vertical, and sagittal spatial-numerical associations. *Psychological Research*, 87(4), 1256-1266. <https://doi.org/10.1007/s00426-022-01721-8>
- Basso Moro, S., Dell'Acqua, R., & Cutini, S. (2018). The SNARC effect is not a unitary phenomenon. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25, 688-695. <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1408-3>
- Brysbaert, M. (1995). Arabic number reading: On the nature of the numerical scale and the origin of phonological recoding. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124(4), 434. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.124.4.434>
- Bulf, H., de Hevia, M. D., & Macchi Cassia, V. (2016). Small on the left, large on the right: Numbers orient visual attention onto space in preverbal infants. *Developmental Science*, 19(3), 394-401. <https://doi.org/10.1111/desc.12315>
- Chen, Y. H., Zhou, J. F., & Yeh, S. L. (2015). Beyond the SNARC effect: Distance–number mapping occurs in the peripersonal space. *Experimental Brain Research*, 233(5), 1519-1528. <https://doi.org/10.1007/s00221-015-4225-9>
- Collewyn, H., Erkelens, C. J., & Steinman, R. M. (1988). Binocular co-ordination of human horizontal saccadic eye movements. *The Journal of Physiology*, 404(1), 157-182. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1988.sp017284>
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1-2), 1-42. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90049-N](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N)
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and numerical magnitude. *Journal of Experimental Psychology General*, 122, 371–396. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371>

- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Toward an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.
- Dehaene, S., Dupoux, E., & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(3), 626. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.16.3.626>
- Dolores de Hevia, M., Girelli, L., & Vallar, G. (2006). Numbers and space: A cognitive illusion? *Experimental Brain Research*, 168, 254-264. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0084-0>
- de Hevia, M. D., & Spelke, E. S. (2010). Number-space mapping in human infants. *Psychological Science*, 21(5), 653-660. <https://doi.org/10.1177/0956797610366091>
- Fantz, R. L. (1964). Visual experience in infants: Decreased attention to familiar patterns relative to novel ones. *Science*, 146(3644), 668-670. <https://doi.org/10.1126/science.146.3644.668>
- Fias, M., Brysbaert, M., Geypens, F., & d'Ydewalle, G. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition*, 2(1), 95–110. <https://doi.org/10.1080/135467996387552>
- Galton, F. (1880). Visualised numerals. *Nature*, 21(533), 252-256. <https://doi.org/10.1038/021252a0>
- Gevers, W., Reynvoet, B., & Fias, W. (2003). The mental representation of ordinal sequences is spatially organized. *Cognition*, 87(3), B87-B95. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(02\)00234-2](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(02)00234-2)
- Gevers, W., Reynvoet, B., & Fias, W. (2004). The mental representation of ordinal sequences is spatially organised: Evidence from days of the week. *Cortex*, 40(1), 171–172. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70938-9](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70938-9)
- Gevers, W., Lammertyn, J., Notebaert, W., Verguts, T., & Fias, W. (2006). Automatic response activation of implicit spatial information: Evidence from the SNARC effect. *Acta Psychologica*, 122(3), 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.11.004>
- Gobel, E. W., Parrish, T. B., & Reber, P. J. (2011). Neural correlates of skill acquisition: Decreased cortical activity during a serial interception sequence learning

- task. *Neuroimage*, 58(4), 1150-1157. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.06.090>
- Hartmann, M., Grabherr, L., & Mast, F. W. (2012). Moving along the mental number line: Interactions between whole-body motion and numerical cognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(6), 1416–1417. <https://doi.org/10.1037/a0026706>
- Hesse, P. N., & Bremmer, F. (2017). The SNARC effect in two dimensions: Evidence for a frontoparallel mental number plane. *Vision Research*, 130, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.10.007>
- Hoffmann, D., Mussolin, C., Martin, R., & Schiltz, C. (2014). The impact of mathematical proficiency on the number-space association. *PLoS one*, 9(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085048>
- Holmes, K. J., & Lourenco, S. F. (2012). Orienting numbers in mental space: Horizontal organization trumps vertical. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65, 1044–1051. <https://doi.org/10.1080/17470218.2012.685079>
- Ito, Y., & Hatta, T. (2004). Spatial structure of quantitative representation of numbers: Evidence from the SNARC effect. *Memory & Cognition*, 32, 662-673. <https://doi.org/10.3758/BF03195857>
- Kant, I. (1781/1904). *Critica della ragion pura* (G. Gentile & G. Lombardo Radice, Trad.). Laterza.
- Karnath, H. O., & Rorden, C. (2012). The anatomy of spatial neglect. *Neuropsychologia*, 50(6), 1010-1017. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.06.027>
- Knops A., Viarouge A., & Dehaene S. (2009). Dynamic representations underlying symbolic and nonsymbolic calculation: Evidence from the operational momentum effect. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(4), 803–821. <https://doi.org/10.3758/APP.71.4.803>
- Lorch, R. F., & Myers, J. L. (1990). Regression analyses of repeated measures data in cognitive research. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16(1), 149. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.16.1.149>
- McCrink K., Dehaene S., & Dehaene-Lambertz G. (2007). Moving along the number line: Operational momentum in nonsymbolic arithmetic. *Perception and Psychophysics*, 69(8), 1324–1333. <https://doi.org/10.3758/BF03192949>

- Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1973). Determinants of reaction time for digit inequality judgments. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 1, 167-168. <https://doi.org/10.3758/BF03334328>
- Pinhas M. & Fischer M. H. (2008). Mental movements without magnitude? A study of spatial biases in symbolic arithmetic. *Cognition*, 109(3), 408–415. <https://doi.org/10.3758/BF03334328>
- Priftis, K., Zorzi, M., Meneghello, F., Marenzi, R., & Umiltà, C. (2006). Explicit versus implicit processing of representational space in neglect: Dissociations in accessing the mental number line. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(4), 680-688. <https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.4.680>.
- Proctor, R. W., & Cho, Y. S. (2006). Polarity correspondence: A general principle for performance of speeded binary classification tasks. *Psychological Bulletin*, 132(3), 416. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.3.416>
- Rasoulzadeh, V., Sahan, M. I., van Dijck, J. P., Abrahamse, E., Marzecova, A., Verguts, T., & Fias, W. (2021). Spatial attention in serial order working memory: An EEG study. *Cerebral Cortex*, 31(5), 2482-2493. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa368>
- Restle, F. (1970). Speed of adding and comparing numbers. *Journal of Experimental Psychology*, 83(2p1), 274. <https://doi.org/10.1037/h0028573>
- Rizzolatti, G., Scandolara, C., Matelli, M., & Gentilucci, M. (1981). Afferent properties of periarculate neurons in macaque monkeys. II. Visual responses. *Behavioural Brain Research*, 2(2), 147-163. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(81\)90053-X](https://doi.org/10.1016/0166-4328(81)90053-X)
- Roettger, T. B., & Domahs, F. (2015). Grammatical number elicits SNARC and MARC effects as a function of task demands. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(6), 1231-1248. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.979843>
- Santens S. & Gevers W. (2008). The SNARC effect does not imply a mental number line. *Cognition*, 108(1), 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.01.002>
- Schwarz, W., & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line: Comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & Psychophysics*, 66, 651-664. <https://doi.org/10.3758/BF03194909>

- Shaki, S., & Fischer, M. H. (2008). Reading space into numbers—a cross-linguistic comparison of the SNARC effect. *Cognition*, 108(2), 590-599. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.04.001>
- Shaki, S., Fischer, M. H., & Petrusic, W. M. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(2), 328-331. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.2.328>
- Shaki, S., & Fischer, M. H. (2012). Multiple spatial mappings in numerical cognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38, 804–809. <https://doi.org/10.1037/a0027562>
- Shaki, S., & Fischer, M. H. (2018). Deconstructing spatial-numerical associations. *Cognition*, 175, 109-113. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.02.022>
- Umiltà, C., Priftis, K., & Zorzi, M. (2009). The spatial representation of numbers: Evidence from neglect and pseudoneglect. *Experimental Brain Research*, 192, 561–569. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1623-2>
- Wagenmakers, E. J., Marsman, M., Jamil, T., Ly, A., Verhagen, J., Love J., Selker R., Gronau Q. F., Šmíra M., Epskamp S., Matzke D., Rouder J. N., Morey, R. D. (2018). Bayesian inference for psychology. Part I: Theoretical advantages and practical ramifications. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25, 35-57. <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1343-3>
- Westfall, P. H., Johnson, W. O., & Utts, J. M. (1997). A Bayesian perspective on the Bonferroni adjustment. *Biometrika*, 84(2), 419-427. <https://doi.org/10.1093/biomet/84.2.419>
- Wiemers, M., Bekkering, H., & Lindemann, O. (2014). Spatial interferences in mental arithmetic: Evidence from the motion–arithmetic compatibility effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(8), 1557-1570. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.889180>
- Winter, B., & Matlock, T. (2013). More is up... and right: Random number generation along two axes. *In Proceedings of the annual meeting of the cognitive science society (Vol. 35, No. 35)*. <https://escholarship.org/uc/item/3cx722ps>
- Winter, B., Matlock, T., Shaki, S., & Fischer, M. H. (2015). Mental number space in three dimensions. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 57, 209-219. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.09.005>
- Zebian, S. (2005). Linkages between number concepts, spatial thinking, and directionality of writing: The SNARC effect and the reverse SNARC effect in English

and Arabic monoliterates, biliterates, and illiterate Arabic speakers. *Journal of Cognition and Culture*, 5(1-2), 165-190.

<https://doi.org/10.1163/1568537054068660>

Zorzi, M., Priftis, K., & Umiltà, C. (2002). Neglect disrupts the mental number line.

Nature, 417(6885), 138-139, 25, 35-57. <https://doi.org/10.1038/417138a>

APPENDICE

Modulo 1

MODULO INFORMATIVO E DI CONSENSO ALLA PARTECIPAZIONE E AL TRATTAMENTO DEI DATI

DESCRIZIONE E SCOPI DELLA RICERCA

Gentile Partecipante,

con il presente documento le chiediamo di fornire il suo consenso informato a partecipare alla ricerca Associazioni tra numeri e spazio in un ambiente di realtà immersiva coordinata da Konstantinos Priftis.

Obiettivo della ricerca: Indagare sistematicamente la presenza di associazioni tra numeri e spazio all'interno di un ambiente tridimensionale simulato, incardinato sulla combinazione dei tre assi cartesiani (orizzontale, verticale e sagittale).

METODOLOGIA DI RICERCA

Cosa le verrà chiesto: svolgere un semplice compito di giudizio di parità mentre viene rilevata la velocità di risposta. Più precisamente, verranno presentati dei numeri arabi in diverse posizioni spaziali all'interno di un ambiente tridimensionale simulato. Il compito consisterà nel giudicare il più rapidamente possibile, premendo un tasto, la parità di tali numeri (decidere se il numero presentato è pari o dispari). Alla fine dell'esperimento, verrà chiesto di rispondere ad alcune domande sull'esperimento appena svolto.

In dettaglio, verranno utilizzati i seguenti strumenti:

- Raccolta dati comportamentali. Gli strumenti utilizzati saranno lo schermo del laboratorio di realtà immersiva (laboratorio C02 -CAVE-, Dipartimento di Psicologia Generale, Università di Padova), su cui verrà presentata l'immagine di un corridoio all'interno del quale verranno presentati dei numeri arabi in diverse posizioni spaziali, e una *response box* per la registrazione dei tempi di reazione del partecipante. Posti di fronte a uno schermo che crea una percezione di realtà immersiva, i partecipanti dovranno svolgere un semplice compito al computer (i.e., decidere, premendo un tasto, se dei numeri presentati sullo schermo siano pari o dispari). Alla fine dell'esperimento, ai partecipanti sarà chiesto di rispondere ad alcune domande circa l'esperimento appena svolto.

LUOGO E DURATA DELLA RICERCA

La ricerca sarà svolta presso:

Laboratorio C02 del Dipartimento di Psicologia Generale dell'Università degli Studi di Padova

e avrà una durata complessiva di: 40 minuti. I tempi saranno così suddivisi nelle singole prove: lettura consenso informato (5'); sessione di prova (1'); sessione sperimentale (20'. Ogni 5' è prevista una pausa di 1'); domande conclusive sull'esperimento appena svolto (5').

*La ricerca sarà svolta previa autorizzazione di DPG. Si informa inoltre che la partecipazione alla ricerca è completamente libera e disgiunta dalle cure/trattamenti/corsi eventualmente somministrati dall'Ente DPG e che l'Ente DPG avrà/non avrà accesso né ai dati della ricerca né ai dati sensibili del partecipante.

RECAPITI

- Responsabile della ricerca: Konstantinos Priftis, PRIMA FASCIA, afferente a DPG. Indirizzo: via Venezia 8, 35131, Padova, tel. 049 8277468, email konstantinos.priftis@unipd.it
- Responsabile della raccolta dati: Dott.ssa Caterina Dapor, Dottoranda afferente al Dipartimento di Psicologia Generale dell'Università degli Studi di Padova, via Venezia 12, 35131, Padova; telefono: 049 8276671; e-mail: caterina.dapor@phd.unipd.it
- Eventuali altri recapiti:

CONSENSO ALLA PARTECIPAZIONE E AL TRATTAMENTO DEI DATI

La/Il sottoscritt_ (COGNOME E NOME IN STAMPATELLO)

acconsente liberamente a partecipare allo studio dal titolo Associazioni tra numeri e spazio in un ambiente di realtà immersiva

DICHIARO

- i Di essere consapevole di potersi ritirare dallo studio in qualunque momento, senza fornire spiegazioni, senza alcuna penalizzazione e ottenendo il non utilizzo dei dati.
- ii Di essere consapevole che i dati saranno raccolti in forma confidenziale (nome/codice) e che qualora lo desiderasse, può ottenere la restituzione dei dati grezzi.
- iii Di essere a conoscenza che, qualora lo desiderasse, può ottenere la restituzione dei dati grezzi congiuntamente ai relativi dati normativi di riferimento. Poiché il presente studio non ha finalità cliniche, sono consapevole che dovrò rivolgermi ad uno specialista per l'eventuale interpretazione dei dati.
- iv Di sapere che una copia del presente modulo mi sarà consegnata dal ricercatore.
- v Di acconsentire alla condivisione dei dati ottenuti grazie alla mia partecipazione ai soli fini scientifici (pubblicazioni scientifiche, condivisio, ecc.) dopo procedura di pseudonomizzazione in maniera che non si possa risalire in alcun modo alla mia identità.

Firma

CONSENSO ALLA PARTECIPAZIONE ALLA RICERCA

La/Il sottoscritt_ (COGNOME E NOME IN STAMPATELLO)

_____ presa visione delle informazioni sopra riportate esprime il proprio consenso alla partecipazione alla ricerca Associazioni tra numeri e spazio in un ambiente di realtà immersiva di cui è responsabile il/la Dott./Prof. Konstantinos Priftis

Data _____

Firma

leggibile

MODULO INFORMATIVO E DI CONSENSO POST-HOC ALLA PARTECIPAZIONE E AL TRATTAMENTO DEI DATI

DESCRIZIONE E SCOPI DELLA RICERCA

Gentile Partecipante,

L'obiettivo della ricerca Associazioni tra numeri e spazio in un ambiente di realtà immersiva alla quale ha preso parte era:

Indagare sistematicamente la presenza di associazioni tra numeri e spazio all'interno di un ambiente tridimensionale simulato, incardinato sulla combinazione dei tre assi cartesiani (orizzontale, verticale e sagittale).

A tal fine le è stato chiesto di: svolgere un semplice compito di giudizio di parità mentre viene rilevata la velocità di risposta. Più precisamente, verranno presentati dei numeri arabi in diverse posizioni spaziali all'interno di un ambiente tridimensionale simulato. Il compito consisterà nel giudicare il più rapidamente possibile, premendo un tasto, la parità di tali numeri (decidere se il numero presentato è pari o dispari). Alla fine dell'esperimento, verrà chiesto di rispondere ad alcune domande sull'esperimento appena svolto.

Se dopo aver ricevuto le delucidazioni riguardo ai veri obiettivi della ricerca acconsente alla partecipazione le chiediamo di prendere visione delle clausole sottostanti e di firmare il modulo

RECAPITI

- Responsabile della ricerca: Konstantinos Priftis, PRIMA FASCIA, afferente a DPG. Indirizzo: via Venezia 8, 35131, Padova, tel. 049 8277468, email konstantinos.priftis@unipd.it.
- Responsabile della raccolta dati: Dott.ssa Caterina Dapor, Dottoranda afferente al Dipartimento di Psicologia Generale dell'Università degli Studi di Padova, via Venezia 12, 35131, Padova; telefono: 049 8276671; e-mail: caterina.dapor@phd.unipd.it
- Eventuali altri recapiti:

CONSENSO ALLA PARTECIPAZIONE E AL TRATTAMENTO DEI DATI

La/Il sottoscritt_ (COGNOME E NOME IN STAMPATELLO)

acconsente liberamente a partecipare allo studio dal titolo Associazioni tra numeri e spazio in un ambiente di realtà immersiva

Dichiaro:

Di essere consapevole di potersi ritirare dallo studio in qualunque momento, senza fornire spiegazioni, senza alcuna penalizzazione e ottenendo il non utilizzo dei dati.

Di essere consapevole che i dati saranno raccolti in forma confidenziale (nome/codice) e che qualora lo desiderasse, può ottenere la restituzione dei dati grezzi.

Di essere a conoscenza che, qualora lo desiderasse, può ottenere la restituzione dei dati grezzi congiuntamente ai relativi dati normativi di riferimento. Poiché il presente studio non ha finalità cliniche, sono consapevole che dovrò rivolgermi ad uno specialista per l'eventuale interpretazione dei dati.

Di sapere che una copia del presente modulo mi sarà consegnata dal ricercatore.

Firma

INFORMATIVA SUL TRATTAMENTO DEI DATI PERSONALI

Questa informativa viene resa ai sensi degli artt. 13 e 14 del Regolamento UE 2016/679 (Regolamento generale sulla protezione dei dati, in seguito Regolamento UE), in relazione ai dati personali che l'Università degli Studi di Padova (in seguito Università) tratta nello svolgimento delle attività previste dal progetto di ricerca Associazioni tra numeri e spazio in un ambiente di realtà immersiva. Il trattamento dei dati personali rispetta i principi di correttezza, liceità, trasparenza e di tutela della riservatezza e dei diritti degli interessati.

PROGETTO DI RICERCA: Associazioni tra numeri e spazio in un ambiente di realtà immersiva

TITOLARE DEL TRATTAMENTO: Università degli Studi di Padova - DPG

RESPONSABILE SCIENTIFICO: Konstantinos Priftis, DPG, via Venezia 8, 35131, Padova, tel. 049 8277468, email konstantinos.priftis@unipd.it

INFORMAZIONI PRIVACY: <http://ethos.psy.unipd.it/> , privacy@unipd.it

1. Fonti e tipologia di dati
2. Finalità del trattamento dei dati
3. Modalità del trattamento dei dati
4. Base giuridica del trattamento e natura del conferimento
5. Soggetti destinatari dei dati
6. Conservazione dei dati
7. Diritti dell'interessato
8. Modalità di esercizio dei diritti
9. Responsabile della protezione dei dati
10. Eventuali modifiche all'informativa

Fonti e tipologia di dati

I dati personali forniti direttamente dall'interessato o dal soggetto minore di cui si ha la responsabilità genitoriale, sono:

- a) Dati comuni. Dati anagrafici, identificativi e di contatto (email, contatti telefonici);
- b) Categorie particolari di dati. Dati relativi alla salute, alle convinzioni politiche, ecc. [vedi art. 9 GDPR].

Finalità del trattamento dei dati

I dati sono trattati esclusivamente per le finalità connesse allo svolgimento e alla divulgazione delle attività istituzionali dell'Università. In particolare, i dati vengono trattati ai fini di ricerca scientifica nell'ambito del progetto Associazioni tra numeri e spazio in un ambiente di realtà immersiva. Gli obiettivi specifici del progetto di ricerca sono: *Indagare sistematicamente la presenza di associazioni tra numeri e spazio all'interno di un ambiente tridimensionale simulato, incardinato sulla combinazione dei tre assi cartesiani (orizzontale, verticale e sagittale).*

I dati personali potranno essere conservati e trattati dall'Università anche per altri scopi di ricerca scientifica affini e riconducibili ai settori scientifico-disciplinari dell'area di ricerca in Psicologia [settore o ambito di ricerca].

Modalità del trattamento dei dati

I dati personali degli interessati vengono raccolti tramite:

- Raccolta dati comportamentali. Gli strumenti utilizzati saranno lo schermo del laboratorio di realtà immersiva (laboratorio C02 -CAVE-, Dipartimento di Psicologia Generale, Università di Padova), su cui verrà presentata l'immagine di un corridoio all'interno del quale verranno presentati dei numeri arabi in diverse posizioni spaziali, e una response box per la registrazione dei tempi di reazione del partecipante. Posti di fronte a uno schermo che crea una percezione di realtà immersiva, i partecipanti dovranno svolgere un semplice compito al computer (i.e., decidere, premendo un tasto, se dei numeri

presentati sullo schermo siano pari o dispari). Alla fine dell'esperimento, ai partecipanti sarà chiesto di rispondere ad alcune domande circa l'esperimento appena svolto.

Il trattamento dei dati viene effettuato in modo da garantire la massima sicurezza e riservatezza e potrà essere attuato mediante strumenti manuali, informatici e telematici idonei a memorizzarli, gestirli e trasmetterli. L'Università non ricorre a processi decisionali automatizzati relativi ai diritti dell'interessato sulla base dei dati personali, compresa la profilazione, nel rispetto delle garanzie previste dall'art. 22 del Regolamento UE.

I dati personali raccolti sono conservati in hard disk istituzionali protetti da password e accessibili solo previa autorizzazione del responsabile scientifico e in conformità alle misure di sicurezza e organizzative stabilite nella privacy policy dell'ente di riferimento, specificate nell'allegato 1 [indicare le misure di sicurezza adottate in concreto] al fine di garantire:

- a) *l'anonimizzazione, la pseudonimizzazione o la cifratura dei dati personali
- b) la continuativa riservatezza, integrità, disponibilità e resilienza dei sistemi che trattano i dati personali;
- c) la capacità di ripristinare tempestivamente la disponibilità e l'accesso ai dati personali in caso di incidente fisico o tecnico.

Base giuridica del trattamento e natura del conferimento

Base giuridica del trattamento è l'esecuzione di compiti di interesse pubblico di ricerca, didattica e cosiddetta "terza missione", istituzionalmente affidati all'Università (art. 6, par. 1, lett. e, del Regolamento UE). Se vengono trattati dati personali particolari (per es. relativi alla salute), la base giuridica del trattamento è il consenso dell'interessato. Il conferimento dei dati personali è necessario per partecipare alla ricerca Associazioni tra numeri e spazio in un ambiente di realtà immersiva.

Soggetti destinatari dei dati.

I dati potranno essere comunicati, esclusivamente per le finalità indicate al punto 2, al personale dell'Università e a collaboratori anche autonomi che prestano attività di supporto per la realizzazione e la gestione delle attività previste dal progetto di ricerca. I dati raccolti verranno utilizzati (diffusi o comunicati) esclusivamente in maniera aggregata e anonima, ai fini di pubblicazione scientifica. Sono destinatari dei dati anche i soggetti esterni nominati responsabili del trattamento ai sensi dell'art. 28, del Regolamento UE 2016/679, tra cui:

- a) Nome dell'Ente esterno _____
- b) Nome dell'Ente esterno [la società proprietaria di piattaforma online che eroga un servizio di automatizzazione di campagne via e-mail, web service, ecc].

I dati raccolti di norma non vengono trasferiti in Paesi non appartenenti all'Unione Europea. In ogni caso, l'Università provvede ad accertare il rispetto delle norme di sicurezza per la protezione dei dati personali degli interessati.

Conservazione dei dati

I dati personali sono conservati in una forma che consente l'identificazione degli interessati per un arco di tempo non superiore al conseguimento delle finalità di ricerca riportate nel punto 2. I dati personali possono essere conservati per periodi più lunghi esclusivamente a fini di archiviazione nel pubblico interesse, di ricerca scientifica o storica o a fini statistici, conformemente all'articolo 89, paragrafo 1, GDPR e fatta salva l'attuazione di misure tecniche e organizzative necessarie per la tutela dei diritti e delle libertà dell'interessato.

Diritti dell'interessato

All'interessato sono riconosciuti i seguenti diritti:

- a) diritto di accesso, rettifica o integrazione dei propri dati (artt. 15 e 16 Regolamento UE);
- b) diritto alla cancellazione (diritto all'oblio), ai sensi dell'art. 17 Regolamento UE;
- c) diritto alla limitazione del trattamento alle condizioni di cui all'art. 18 Regolamento UE;
- d) diritto alla portabilità dei dati, così come disciplinato dall'art. 20 Regolamento UE;
- e) diritto di opporsi in qualsiasi momento al trattamento (art. 21 Regolamento UE);

L'interessato può proporre reclamo al Garante per la protezione dei dati personali.

L'interessato può revocare in qualsiasi momento il consenso al trattamento dei propri dati personali. In tal caso, non saranno raccolti ulteriori dati personali dell'interessato, ferma restando l'utilizzazione dei dati eventualmente già raccolti e necessari per determinare, senza alterarli, i risultati della ricerca

e dei dati che, in origine o a seguito di trattamento, non sono riconducibili a una persona identificata o identificabile.

Modalità di esercizio dei diritti

Per esercitare i propri diritti l'interessato può scrivere all'indirizzo di posta elettronica _____ (pec), eventuale riferimento progetto _____

In alternativa, l'interessato può scrivere a: Università degli Studi di Padova, via VIII Febbraio n. 2, Padova. L'Università risponde di norma entro un mese dalla richiesta. In caso di particolare complessità della richiesta, l'Università risponde entro e non oltre tre mesi dalla richiesta.

Responsabile della protezione dei dati

Il Responsabile della protezione dei dati, nominato ai sensi dell'art. 37 del Regolamento UE, può essere contattato al seguente indirizzo e-mail: privacy@unipd.it.

Eventuali modifiche all'informativa

Le eventuali modifiche e integrazioni a questa informativa saranno pubblicate nella sezione Privacy del sito <http://ethos.psy.unipd.it/>. L'Università si impegna a comunicare direttamente agli interessati le eventuali modifiche delle finalità del trattamento, dell'identità del titolare del trattamento e ogni altra modifica in grado di incidere in modo significativo sui diritti degli interessati o sul loro esercizio.

CONSENSO AL TRATTAMENTO DEI DATI PARTICOLARI

Io sottoscritto/a, _____, nato/a _____
(____), il ____ / ____ / _____, residente a _____
(____), indirizzo: _____ n° _____
CAP _____,

☐ **acconsento**

☐ **non acconsento**

al trattamento dei miei dati personali nell'ambito del progetto di ricerca Associazioni tra numeri e spazio in un ambiente di realtà immersiva come specificato nell'informativa pubblicata alla pagina web <http://ethos.psy.unipd.it/> e ricevuta in data odierna, ai sensi dell'art. 13 Regolamento UE 2016/679

Luogo e data, _____

firma _____

☐ **acconsento**

☐ **non acconsento**

All'audio/video registrazione

Luogo e data, _____

firma _____