



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia dello Sviluppo e della Socializzazione

Dipartimento di Psicologia Generale

Corso di laurea magistrale in Psicologia Clinica dello Sviluppo

Tesi di laurea magistrale

**Il controllo cognitivo adattivo nel Disturbo dello Spettro
dell'Autismo (ASD): come l'aspettativa temporale
implicita influenza il controllo inibitorio**

**Adaptive cognitive control in Autism Spectrum Disorder (ASD): how
implicit temporal expectancy shapes inhibitory control**

Relatore

Prof. Giovanni Mento

Correlatrice

Dott.ssa Lisa Toffoli

Laureanda: Chiara Lissandron

Matricola: 2017394

INDICE

PREFAZIONE	1
1. IL CONTROLLO COGNITIVO	3
1.1 DEFINIZIONE E MODELLI NEUROPSICOLOGICI	3
1.1.1 Modelli del controllo cognitivo.....	3
1.1.2 Controllo cognitivo fra unità e diversità: il ruolo della corteccia prefrontale.....	7
1.2 TRAIETTORIE EVOLUTIVE E STRUMENTI DI VALUTAZIONE DEL CONTROLLO COGNITIVO	8
1.2.1 Traiettorie evolutive del controllo inibitorio.....	8
1.2.2 Traiettorie evolutive della <i>working memory</i> (WM).....	9
1.2.3 Traiettorie evolutive della flessibilità cognitiva.....	9
1.2.4 Strumenti di valutazione e compiti sperimentali del controllo cognitivo.....	10
1.3 IL CONTROLLO COGNITIVO ADATTIVO	11
1.3.1 <i>Dual model network</i>	12
1.3.2 La prospettiva dell'apprendimento associativo sul controllo cognitivo.....	13
1.3.3 Come indagare il controllo cognitivo adattivo?.....	15
1.4 IL CERVELLO PREDITTIVO	18
1.4.1 Meccanismi di apprendimento implicito.....	18
1.4.2 Predizioni temporali guidate da stimoli interni ed esterni.....	19
1.4.3 Predizioni temporali guidate da caratteristiche locali e globali.....	20
2. DISTURBO DELLO SPETTRO DELL'AUTISMO (ASD)	23
2.1 CRITERI DIAGNOSTICI, MANIFESTAZIONI E CARATTERISTICHE CLINICHE	23
2.1.1 Alterazioni nel dominio sociocomunicativo e nel dominio dei comportamenti ristretti e stereotipati.....	24
2.2 MODELLI ESPLICATIVI E NEUROPSICOLOGICI DELL'ASD	25
2.2.1 L'influenza della genetica.....	25
2.2.2 Modelli dominio-generalisti e dominio-specifici.....	26
2.3 I MODELLI PREDITTIVI DELL'ASD	28
2.4 ABILITÀ DI PREDIZIONE E CARATTERISTICHE FENOTIPICHE NELL'ASD	30
2.4.1 Abilità di predizione ed elaborazione percettiva degli stimoli nell'ASD.....	30
2.4.2 Abilità di predizione e dominio cognitivo nell'ASD.....	31
3. LA RICERCA	34
3.1 OBIETTIVI	34
3.2 METODO	34
3.2.1 Soggetti.....	34
3.2.2 Conformità etica.....	35
3.2.3 Strumenti.....	36

3.2.3.1 <i>Dynamic Temporal Prediction Task Go No-Go</i> (Mento et al., in prep.).....	36
3.2.3.2 Questionari	39
3.2.4 Procedura.....	40
3.2 IPOTESI SPERIMENTALI.....	41
3.3 ANALISI DEI DATI.....	42
4. RISULTATI.....	45
4.1 H1: ADATTAMENTO AL CONTESTO PREDITTIVO LOCALE.....	45
4.2 H2A: ADATTAMENTO AL CONTESTO PREDITTIVO GLOBALE.....	46
4.3 H2B: ANDAMENTO EVOLUTIVO DELL'ADATTAMENTO AL CONTESTO PREDITTIVO GLOBALE.....	47
4.4 H3A E H3B: IL CONTROLLO INIBITORIO	50
5. DISCUSSIONE.....	53
5.1 DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	53
5.1.1 Adattamento al contesto predittivo locale	53
5.1.2 Adattamento al contesto predittivo globale.....	54
5.2 LIMITI.....	56
5.3 IMPLICAZIONI IN AMBITO SPERIMENTALE E CLINICO	57
BIBLIOGRAFIA.....	60

PREFAZIONE

Il controllo cognitivo è stato tradizionalmente concettualizzato come un insieme di processi di tipo *top-down* che permettono di agire in maniera indipendente e finalizzata (Vicari & Caselli, 2017). Recentemente è emersa una nuova prospettiva associativa nei confronti del controllo cognitivo (Braem & Egner, 2018) che ha introdotto il concetto di controllo cognitivo “adattivo”. Quest’ultimo può essere definito come un insieme di processi cognitivi che si adattano in maniera flessibile alle caratteristiche di regolarità statistica dell’ambiente (Braem, 2019). Alcuni studi (D’Souza et al., 2016) hanno ipotizzato che questa capacità sia compromessa nei disturbi del neurosviluppo sottolineando, così, la necessità di investigare l’adattamento del controllo cognitivo in queste popolazioni cliniche. Questo elaborato si propone di investigare il controllo cognitivo adattivo nel Disturbo dello Spettro dell’Autismo (ASD). Studiare tale fenomeno nel contesto dell’ASD è di fondamentale importanza non solo perché consente di approfondire le traiettorie evolutive atipiche dell’adattamento del controllo cognitivo, ma anche perché permette di indagare il funzionamento della cognizione predittiva di questa popolazione clinica. Infatti, recenti modelli neuropsicologici ipotizzano la presenza di meccanismi predittivi atipici nell’ASD (Pellicano & Burr, 2012; Sinha et al., 2014; Lawson, Rees & Friston, 2014; van der Cruys et al., 2014). Nella presente ricerca è stato somministrato il *Dynamic Temporal Prediction Task Go/NoGo* (DTP GNG, Mento et al., in prep.), compito sperimentale che permette di investigare il controllo inibitorio in un contesto caratterizzato da variazioni implicite dell’aspettativa temporale indotte a livello globale (blocco per blocco) e locale (*trial per trial*), ad un gruppo di bambini con ASD e a un gruppo di bambini a sviluppo tipico (6 – 15 anni). I risultati suggeriscono che nell’ASD è assente la capacità di adattarsi al contesto predittivo locale, abilità che emerge, in traiettorie evolutive tipiche, già a partire dai 6 anni in linea con studi precedenti (Mento & Granzio, 2020). Per quanto concerne l’adattamento al contesto predittivo globale, le evidenze ottenute suggeriscono che le persone a sviluppo tipico, soprattutto a partire dall’adolescenza, sono in grado di ottimizzare il controllo inibitorio lungo il compito modulando la velocità di risposta alle spinte proattive indotte dalle regolarità temporali degli stimoli, mostrando pertanto un controllo cognitivo adattivo flessibile alle richieste del compito specifico. I partecipanti con diagnosi di ASD, al contrario, pur adattando la loro velocità di risposta alle regolarità temporali del compito, non riescono a tradurre la capacità di generare e aggiornare l’aspettativa temporale in funzione delle richieste di

inibizione del compito, ottenendo di conseguenza un'accuratezza inferiore rispetto a quella dei soggetti tipici. Nel complesso, queste evidenze suggeriscono la presenza di una compromissione nell'uso adattivo e flessibile del controllo cognitivo (Pennington & Ozonoff, 1996, Solomon et al., 2008) e/o di una difficoltà nel modulare i modelli predittivi interiorizzati alle richieste specifiche dell'ambiente (Pellicano & Burr, 2012; Sinha et al., 2014; Lawson, Rees & Friston, 2014; van der Cruys et al., 2014). Lo studio condotto rappresenta un approccio innovativo allo studio del controllo cognitivo nell'ASD e permette di studiarne la flessibilità cognitiva in una prospettiva adattiva. I risultati forniscono un utile punto di partenza per futuri studi e racchiudono importanti implicazioni in ambito educativo e clinico.

1. IL CONTROLLO COGNITIVO

1.1 DEFINIZIONE E MODELLI NEUROPSICOLOGICI

Il termine funzioni esecutive, introdotto per la prima volta da Lezak (1983), si riferisce ad una serie di abilità cognitive che permettono di comportarsi in maniera indipendente, finalizzata e adattiva (Vicari & Caselli, 2017); possono essere definite come un insieme di processi di controllo di tipo *top-down* che vengono utilizzati quando potrebbe essere impossibile, insufficiente o imprudente affidarsi a processi di tipo automatici o all'istinto (Diamond, 2013). Il termine funzioni esecutive viene spesso riferito come sinonimo di controllo cognitivo (Friedman & Robinson, 2021), concetto che fa riferimento ad un insieme di processi di alto ordine che permettono di dirigere, correggere e guidare il nostro comportamento in maniera coerente con i nostri obiettivi interni e con il contesto esterno (Braem et al., 2019). Entrambi i termini, infatti, fanno riferimento ad un processo di regolazione comportamentale che viene implementato al fine di ottimizzare comportamenti orientati ad un obiettivo (Friedman & Robinson, 2021). Al fine di evitare incomprensioni, in questo elaborato, utilizzeremo il termine controllo cognitivo come sinonimo di funzioni esecutive. Il controllo cognitivo è ed è stato ampiamente studiato dalla letteratura in quanto svolge un ruolo fondamentale per lo sviluppo cognitivo, psicologico e sociale (Diamond, 2013); inoltre, questa capacità sembra rappresentare un predittore affidabile di una serie di importanti variabili relative al successo scolastico, lavorativo ed alla salute fisica e mentale (Moffitt et al., 2011).

1.1.1 Modelli del controllo cognitivo

Nel corso della storia, svariati autori hanno definito il controllo cognitivo in maniera differente. In linea generale, i diversi modelli si differenziano fra di loro in quanto alcuni definiscono il controllo cognitivo come un costrutto unitario, mentre altri lo definiscono come un costrutto multi-componenziale. Per quanto riguarda i modelli unitari, essi considerano il controllo cognitivo come costituito da un unico sistema supervisore indivisibile in sottocomponenti. Tra i più importanti vi sono il modello di Norman e Shallice (1986) ed il modello di Baddeley (1974). Il primo modello teorizza l'esistenza di un sistema unico e globale, denominato Sistema Supervisore Attentivo (SAS), che viene reclutato in situazioni nuove e/o pericolose al fine di contrastare risposte automatiche e mettere in atto comportamenti pianificati. Allo stesso modo, il modello di Baddeley (1974), che si focalizza su un unico dominio del controllo cognitivo, ossia sulla *working memory*, teorizza la presenza di un sistema esecutivo centrale che è strettamente

coinvolto nella messa in atto di comportamenti finalizzati. Questo sistema ha il ruolo di dirigere le risorse attentive per determinare come devono essere elaborate le informazioni (Baddeley, 1998, 2003). Al contrario, la visione multi-componenziale del controllo cognitivo valuta tale costrutto come divisibile in specifiche componenti che possono essere più o meno indipendenti fra di loro. Questa visione è supportata da svariate evidenze; ad esempio, studi evolutivi hanno rilevato che componenti differenti del controllo cognitivo sono caratterizzate da traiettorie evolutive dissociabili (Diamond, 2013) e studi neurali hanno dimostrato che componenti differenti si associano a *network* prefrontali diversi (Marzocchi & Valagussa, 2011). Uno dei modelli multi-componenziali ad oggi maggiormente condivisi dagli studiosi è quello di Miyake et al. (2000), che concettualizza il controllo cognitivo come l'insieme di tre componenti (inibizione, *working memory* e flessibilità cognitiva). Gli autori hanno sottoposto un ampio campione di soggetti ad una serie di compiti sperimentali che permettono di investigare il controllo cognitivo (ad esempio, il compito di *Stroop*, Stroop, 1935; l'*Antisaccade Task*, Roberts et al., 1994). I dati sono stati elaborati tramite l'analisi fattoriale, una specifica tecnica statistica che permette di estrarre la varianza comune spiegata da diverse misure, e i risultati supportano l'idea che il controllo cognitivo sia costituito da tre differenti componenti tra esse indipendenti ma parzialmente correlate (si veda figura 1):

- l'inibizione, che può essere definita come l'abilità di controllare il proprio comportamento, la propria attenzione, i propri pensieri ed emozioni al fine di contrastare una forte predisposizione interna o una tentazione esterna (Diamond, 2013);
- la *working memory* (WM), che permette di immagazzinare e, simultaneamente, elaborare attivamente le informazioni (Baddeley, 1998, 2003);
- la flessibilità cognitiva, che può essere definita come l'abilità di cambiare approccio o prospettiva nei confronti di un problema al fine di adattarsi in maniera flessibile a nuove richieste, regole o priorità (Diamond, 2013).

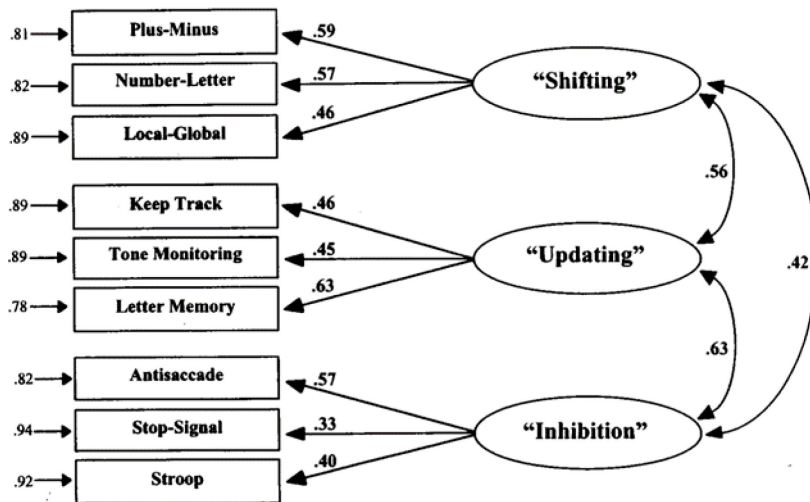


Figura 1: Modello di Miyake et al. (2000) tratto da Miyake et al. (2000).

Questa visione multi-componenziale del controllo cognitivo è supportata anche da Diamond (2013) che sottolinea come inibizione, WM e flessibilità cognitiva siano strettamente legate fra loro e come, a partire da queste componenti di basso livello, derivino funzioni di più alto livello, come la pianificazione, l'abilità di *problem-solving* ed il ragionamento induttivo e deduttivo (si veda figura 2). Questi ultimi due costrutti si sovrappongono al concetto di intelligenza fluida; infatti, misure dell'intelligenza fluida

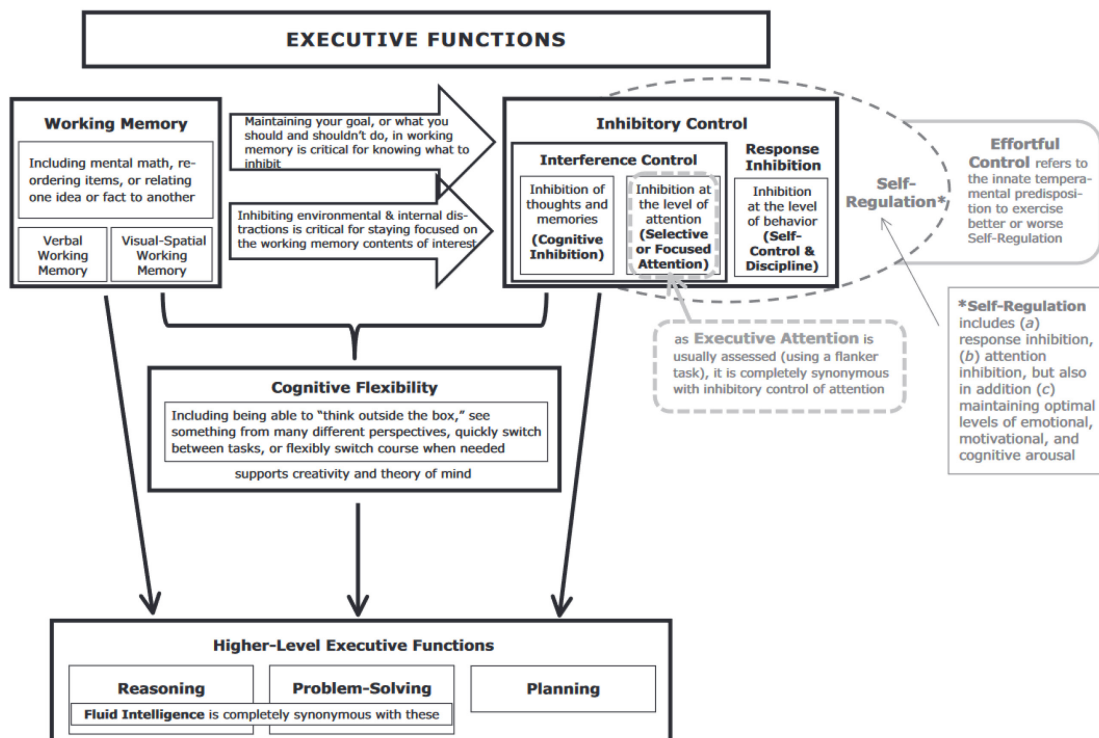


Figura 2: Modello di Diamond (2013).

correlano fortemente con le singole componenti del controllo cognitivo (Roca et al., 2010). In particolare, Diamond (2013) approfondisce il concetto di controllo inibitorio che, secondo l'autrice, comprende sia la capacità di controllare la propria attenzione (*interference control*), che la capacità di controllare i propri comportamenti, emozioni e pensieri (*response inhibition*). Secondo l'autrice questa componente del controllo cognitivo si sovrappone largamente con la capacità di auto-controllo, definita come l'abilità di controllare e regolare le proprie emozioni. Il controllo inibitorio inoltre sarebbe strettamente legato anche alla WM; infatti, l'inibizione permette di rimanere concentrati sulle informazioni mantenute attive nella WM, inibendo stimoli distraenti, e, allo stesso tempo, il contenuto della WM ci indica quali informazioni è necessario inibire o meno. Queste due componenti stanno alla base della terza funzione identificata da Miyake e colleghi, ovvero la flessibilità cognitiva. Diamond et al. (2002) propone un'ulteriore suddivisione del controllo cognitivo attraverso la distinzione di due tipologie di funzioni implicate nell'elaborazione cognitiva: le funzioni *hot* e le funzioni *cold*. Le prime, al contrario delle seconde, implicano un'elaborazione di tipo sociale, morale o affettiva. Le funzioni *cold* comprendono le abilità di pianificazione strategica, di *problem solving*, di inibizione, di WM e di flessibilità cognitiva, e rappresentano dei buoni predittori del livello accademico (Brock et al., 2009). Le funzioni *hot*, invece, includono la capacità di empatia, la teoria della mente, la regolazione emotiva ed il *decision making* affettivo, e rappresentano dei buoni predittori del comportamento sociale (Conner et al., 2008). Infatti, funzioni *cold* sono spesso compromesse in bambini con problemi comportamentali (Hughes et al., 2000) ed in adulti con comportamenti devianti (Morgan & Lilienfeld, 2000). Nonostante nella vita quotidiana queste due funzioni siano spesso adoperate simultaneamente, sembra essere presente una dissociazione a livello neurale ed evolutivo. Infatti, evidenze neuropsicologiche e studi di neuroimmagine (Meuwissen & Zelazo, 2014) sembrano suggerire che le funzioni *cold* dipendono principalmente dalla corteccia prefrontale laterale, mentre le funzioni *hot* si associano a regioni ventrali e mediali della corteccia prefrontale (Zelazo & Carlson, 2012). In aggiunta, queste due funzioni sembrano essere caratterizzate da differenti traiettorie evolutive: le funzioni *hot*, infatti, presentano uno sviluppo che si protrae maggiormente nel tempo rispetto alle funzioni *cold* (Meuwissen & Zelazo, 2014).

1.1.2 Controllo cognitivo fra unità e diversità: il ruolo della corteccia prefrontale

Secondo Johnson & De Haan (2015) lo sviluppo della mente e l'acquisizione di nuove competenze rappresenta il frutto delle interazioni bidirezionali fra geni ed ambiente che guidano un processo di specializzazione interattiva dei circuiti cerebrali. Questo processo permette la localizzazione di specifiche funzioni in precisi circuiti neurali e, al contempo, facilita la specializzazione di *network* cerebrali per determinate funzioni secondo il principio per cui *network* che vengono attivati ed usati maggiormente divengono più forti, mentre connessioni non utilizzate vengono eliminate. Le funzioni cognitive, quindi, dipendono da precisi *network* corticali; allo stesso modo, il controllo cognitivo si associa a specifici *network* prefrontali. In particolare, Alvarez & Emory (2006) individuano tre *network* prefrontali che si associano al controllo cognitivo:

- il *network* fronto-laterale che sembra essere coinvolto nel controllo inibitorio, nella WM, nella flessibilità cognitiva e nella pianificazione;
- il *network* ventro-mediale che si associa a processi motivazionali;
- il *network* orbito-frontale che sottende i comportamenti sociali.

È importante sottolineare che nel controllo cognitivo, oltre a questi *network* prefrontali, sono coinvolte anche altre aree, come la corteccia cingolata anteriore e la corteccia parietale (Alvarez & Emory, 2006). Una recente rassegna di Friedman & Robbins (2021), che ha preso in considerazione svariati studi neuropsicologici, ha confermato l'esistenza di *network* prefrontali che mediano il controllo cognitivo, supportando una visione unitaria di tale costrutto; tuttavia, l'esistenza di dissociazioni a livello funzionale suggerisce la presenza di circuiti specializzati (Friedman & Robbins, 2021). Tali evidenze convergono in una visione del controllo cognitivo come un costrutto caratterizzato da unità e da diversità. Questa prospettiva è coerente con i modelli statistici bi-fattoriali (si veda figura 3) che supportano l'idea secondo cui il controllo cognitivo è caratterizzato da un fattore comune di alto livello (*Common CC*) e da fattori ortogonali di basso livello (*Updating-specific* e *Shifting-specific*) che permettono di spiegare la varianza in alcuni compiti (Friedman & Robbins, 2021).

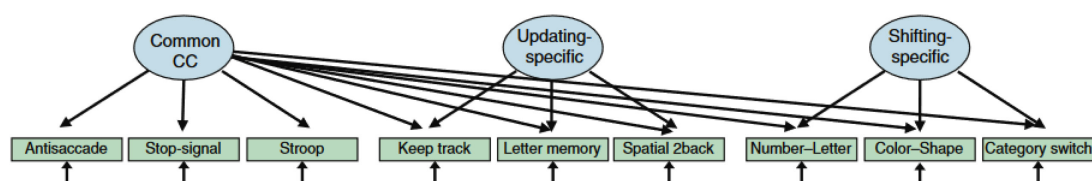


Figura 3: Modello bi-fattoriale del controllo cognitivo (Friedman & Robbins, 2021)

1.2 TRAIETTORIE EVOLUTIVE E STRUMENTI DI VALUTAZIONE DEL CONTROLLO COGNITIVO

Una visione multi-componenziale del controllo cognitivo è supportata anche da Diamond (2013) che evidenzia la presenza di traiettorie evolutive dissociabili per l'inibizione, la WM e la flessibilità cognitiva. Infatti, il controllo cognitivo emerge poco dopo la nascita e continua a svilupparsi lungo tutta l'infanzia, l'adolescenza e l'età adulta; in particolare, un significativo incremento è osservabile tra i 3 e i 5 anni d'età (Tambelli, 2017).

1.2.1 Traiettoria evolutiva del controllo inibitorio

Per quanto riguarda il controllo inibitorio, Johnson & de Haan (2015) teorizzano che già a partire dai 4 mesi di età sia presente una forma primitiva e rudimentale di inibizione e che il suo sviluppo sia strettamente associato alla maturazione di una specifica struttura corticale, denominata *frontal eye fields*. Questa ipotesi è supportata dal fatto che bambini di questa età sono in grado di inibire la tendenza a compiere un movimento saccadico verso un primo stimolo a favore di un secondo stimolo più attraente (Johnson, 1995). Le competenze inibitorie migliorano significativamente fra i 3 ed i 5 anni con un picco intorno ai 4 anni (Diamond et al., 2002), come dimostrato dal fatto che bambini in questa fascia di età sono in grado di posticipare la gratificazione di mangiare un dolcetto nel *test* del *Marshmallow* di Shoda e colleghi (1990). Nonostante questo miglioramento, i bambini in età scolare continuano a mostrare difficoltà significativamente maggiori rispetto agli adulti nel controllo inibitorio, come riportato da Davidson et al. (2006). Infatti, performance comparabili a quelle degli adulti sono raggiunte solo attorno ai 9 anni nel compito sperimentale *Hearts & Flowers*, utilizzato per investigare il controllo inibitorio. Tale compito prevede che, alla presentazione di un determinato stimolo (disegno di un cuore) si debba rispondere dallo stesso lato in cui lo stimolo viene presentato; alla presentazione di un altro stimolo (disegno di un fiore), al contrario, si deve rispondere dal lato opposto. Queste evidenze sono coerenti con lo studio di Passler et al. (1985) che rileva un significativo miglioramento del controllo inibitorio in bambini di 10 anni. Lievi miglioramenti si rilevano anche in adolescenza e si associano ad una maggiore localizzazione dell'attività neurale. I meccanismi alla base di questo sviluppo potrebbero includere maturazione cerebrale, maggiore abilità nel gestire compiti complessi, maggiore abilità nell'utilizzo di regole e l'emergere della meta-cognizione (Best & Miller, 2010).

1.2.2 Traiettorie evolutiva della *working memory* (WM)

Nonostante la capacità di aggiornare le informazioni contenute all'interno della *working memory* sia presente già a partire dai 9-12 mesi di vita, questa componente si sviluppa progressivamente lungo tutto il corso dello sviluppo (Diamond, 2013); in particolare, un incremento significativo della WM sembra avvenire durante l'età prescolare (Marzocchi & Valgussa, 2017). Al contrario della traiettoria evolutiva dell'inibizione, che risulta essere caratterizzata da specifiche finestre temporali in cui occorrono significativi miglioramenti, lo sviluppo della WM sembra seguire un andamento lineare. A tal proposito, i risultati di Gathercole et al. (2004) mostrano che a partire dai 4 anni e lungo tutto il corso dell'adolescenza misure della WM, rilevate con differenti compiti (ad esempio, il *backward digit span* oppure il *backward digit recall*), sembrano mostrare un incremento lineare. A livello neurale, lo sviluppo della WM si associa a cambiamenti neurali regressivi e progressivi che risultano in un pattern di attività localizzato nel *network* fronto-parietale (Best & Miller, 2010). In particolare, le migliori performance di WM visuo-spaziale sono registrate in individui di età compresa fra i 15 ed i 29 anni, mentre tale fascia d'età si alza ai 20-29 anni per la WM verbale (Marzocchi & Valgussa, 2010).

1.2.3 Traiettorie evolutiva della flessibilità cognitiva

In linea col modello di Diamond (2013), l'inibizione e la WM stanno alla base di una terza componente del controllo cognitivo, la flessibilità cognitiva, che si sviluppa tardivamente rispetto alle altre (Davidson et al. 2006). Secondo Zelazo et al. (1996), la flessibilità cognitiva emerge in maniera stabile a partire dai 4-5 anni di età, come dimostrato dal fatto che bambini di questa età riescono ad alternare due regole differenti nel *Dimensional Change Card Sort*; tuttavia, studi successivi (Brooks et al., 2003) dimostrano che già a partire dai 2 anni e mezzo i bambini sono in grado di portare a termine compiti semplici, denominati di *reversal shifting* (Kendler & Kendler, 1959), che coinvolgono una rudimentale forma di flessibilità cognitiva. Questi compiti, che coinvolgono una singola dimensione dello stimolo, richiedono che ad uno specifico input corrisponda una determinata risposta; in un secondo momento, viene richiesto di invertire l'iniziale configurazione stimolo-risposta. La flessibilità cognitiva emerge solo nel momento in cui i bambini sono in grado di ritenere nella WM una risposta prestabilita e di inibire l'attivazione di una risposta al fine di adottarne una differente (Garon et al., 2008). La traiettoria evolutiva di questa componente si protrae lungo tutta l'adolescenza;

infatti, evidenze dimostrano che lo sviluppo della flessibilità cognitiva a 13 anni non è ancora ultimato (Marzocchi & Valgussa, 2011).

1.2.4 Strumenti di valutazione e compiti sperimentali del controllo cognitivo

Il controllo cognitivo può essere valutato tramite la somministrazione di specifici compiti volti ad indagare le singole componenti del controllo cognitivo (Marzocchi & Valgussa, 2011). Per quanto riguarda il controllo inibitorio, esistono svariati compiti sperimentali utilizzati per la valutazione di questa componente. Tra i più noti in letteratura vi è lo *Stroop Task* (Stroop et al., 1935), in cui vengono presentate delle parole di colori, scritte con inchiostri differenti rispetto al significato semantico della parola stessa, a cui si deve rispondere indicando il colore dell'inchiostro inibendo la tendenza automatica di leggere la parola; il *Go/NoGo* (Cragg & Nation, 2008) in cui viene richiesto ai partecipanti di premere un bottone quando un determinato stimolo appare e di non premerlo quando ne appare un altro. Un secondo compito analogo è lo *Stop-signal task* (Verbruggen & Logan, 2008), che richiede di inibire l'azione, divenuta automatica con l'esercizio, di premere un bottone quando un determinato stimolo è presentato nel momento in cui questo si presenta in concomitanza con un altro stimolo (per esempio, un suono). Infine, l'*Antisaccade task* (Roberts et al., 1994) consiste nell'effettuare un movimento saccadico nella direzione opposta a quella in cui un determinato stimolo appare. Non vi è accordo rispetto al fatto che tutti questi compiti valutano allo stesso modo il controllo inibitorio in quanto si differenziano fra di loro per svariate caratteristiche; ad esempio, il compito *Go/NoGo* ed il compito *Stop-signal*, al contrario degli altri compiti citati sopra, non prevedono una condizione di controllo dell'interferenza tra due stimoli o risposte in conflitto tra di loro. Più semplicemente, richiedono di "non fare nulla" in determinate condizioni (es, stimolo *NoGo* o stimolo *Stop*; Diamond, 2013). Per quanto concerne i compiti utilizzati per investigare la WM, è importante effettuare una distinzione fra quest'ultima e la memoria a breve termine (MBT). La MBT fa riferimento ad un magazzino mnestico che, al contrario della WM, non è funzionalmente associato all'elaborazione attiva delle informazioni (Baddeley, 1998, 2003). WM e MBT sono due costrutti dissociabili che presentano traiettorie evolutive differenti e che si associano a sistemi neurali separati (D'Esposito et al., 1999); pertanto, devono essere studiati tramite compiti psicologici differenti. In particolare, il compito più comunemente utilizzato per indagare la WM verbale è il *backward digit span task*, in cui viene richiesto di ripetere in ordine inverso una serie di cifre; mentre per la

componente visuo-spaziale della WM viene comunemente utilizzato il *Corsi Block Test* (Lezak, 1983) che richiede di toccare nello stesso ordine in cui sono stati toccati dall'esaminatore una serie di cubi numerati. Invece, la MBT può essere misurata tramite il *forward – digit span task* (Diamond, 2013), un compito simile al *backward digit span task* in cui bisogna ripetere una serie di cifre nello stesso ordine in cui sono state pronunciate dall'esaminatore. Infine, tra i compiti più usati per investigare la flessibilità cognitiva vi sono il *Wisconsin Card Sorting Task* (WCST) ed il *Trial Making test*. Il primo richiede di pescare da un mazzo di carte una figura che deve essere associata ad una delle quattro carte presenti di fronte al soggetto sulla base di una dimensione che non viene però suggerita al soggetto: le carte possono condividere la stessa forma, lo stesso colore oppure lo stesso numero di simboli. Dopo ogni associazione, viene dato un *feedback* circa la correttezza della regola individuata; successivamente, dopo una serie di *trial* la regola cambia ed il soggetto deve individuare la nuova modalità di associazione evitando di perseverare nella regola precedentemente risultata corretta. Nel *Trial Making Test*, invece, viene richiesto di collegare in ordine un insieme di lettere e di numeri in modo tale da alternare in sequenza le lettere ed i numeri. La stretta interconnessione fra WM ed inibizione mette in discussione la possibilità di investigare separatamente queste due componenti; secondo Diamond (2013) questo obiettivo può essere raggiunto solo minimizzando l'influenza del controllo inibitorio nei compiti utilizzati per investigare la WM e viceversa. Ad esempio, nel compito spaziale di *Stroop* la WM viene coinvolta in maniera minima in quanto gli stimoli presentati, ossia frecce direzionali, indicano dove rispondere. Quindi, eventuali difficoltà nell'esecuzione del compito dovrebbero riflettere delle problematiche prevalentemente a livello del controllo inibitorio. In generale, quando è necessario investigare singole componenti del controllo cognitivo bisogna tenere presente che queste sono strettamente interconnesse fra loro e, quindi, nessuna misura del controllo cognitivo coinvolge una sola componente. Infatti, un bambino potrebbe fallire in un compito di WM a causa di una difficoltà nel controllo inibitorio e viceversa, oppure un bambino potrebbe fallire in un compito di flessibilità cognitiva a causa di una compromissione a carico di WM o del controllo inibitorio (Diamond, 2013).

1.3 IL CONTROLLO COGNITIVO ADATTIVO

Il termine controllo cognitivo adattivo fa riferimento a un aspetto dimensionale dei processi di funzionamento esecutivo, e cioè alla capacità di adattare i meccanismi di controllo in maniera flessibile alle richieste implicite ed esplicite dell'ambiente o a segnali

interni, come la detezione di un conflitto (Braem et al., 2012). Questo termine evidenzia il superamento di una visione statica del controllo cognitivo a favore di una visione dinamica di tale costrutto. Questa nuova prospettiva teorica è coerente con una serie di evidenze che dimostrano che il controllo cognitivo è in grado di ottimizzarsi automaticamente in base alle caratteristiche dell'ambiente (Abrahamse et al., 2016; Braem & Egner, 2018).

1.3.1 *Dual model network*

Uno dei modelli che ha contribuito maggiormente alla comprensione dei meccanismi adattivi alla base del controllo cognitivo è quello di Braver e colleghi (2012). Questi autori hanno proposto l'ipotesi secondo cui il controllo cognitivo può operare attraverso due modalità differenti, che possono essere coinvolte in maniera indipendente o contemporanea. La prima modalità, definita *reattiva*, consente la mobilitazione di risorse attentive solo quando necessario; al contrario, la seconda modalità, definita *proattiva*, permette di mantenere attive le informazioni rilevanti per l'obiettivo da raggiungere nel periodo precedente all'occorrenza di specifici eventi, influenzando in maniera positiva i sistemi relativi all'attenzione ed alla percezione. Ne consegue che il controllo cognitivo reattivo si basa sulla risoluzione dell'interferenza nel momento stesso in cui compare, mentre il controllo cognitivo proattivo viene messo in atto anticipatamente al fine di prevenire l'interferenza. Ogni tipologia di controllo cognitivo presenta dei vantaggi come degli svantaggi. Il controllo cognitivo di tipo proattivo si basa sulla capacità di aggiornare i propri schemi interni in base alle informazioni predittive contestuali, come, ad esempio, le regolarità spazio-temporali degli eventi, al fine di facilitare la realizzazione di un obiettivo. Tuttavia, questa tipologia di controllo consuma un numero elevato di risorse cognitive, rendendo i processi cognitivi meno sensibili alla detezione di informazioni potenzialmente rilevanti per il compito. Questo elevato consumo di risorse non avviene quando è implementato un controllo di tipo reattivo; tuttavia, questa modalità operativa è maggiormente sensibile a distrazioni ed è eccessivamente dipendente da stimoli esterni che potrebbero risultare non sufficientemente salienti da permettere la re-attivazione degli obiettivi. Uno studio di Bruggess & Braver (2010) mostra che il controllo cognitivo di tipo proattivo viene adottato quando l'aspettativa di occorrenza di un'interferenza è alta, mentre il controllo reattivo viene utilizzato per risolvere le interferenze quando queste sono inaspettate. Inoltre, l'utilizzo del controllo cognitivo proattivo o di quello reattivo sembra essere influenzato

non solo da fattori contestuali ma anche da fattori come l'intelligenza fluida (Braver, 2012) o l'età; per esempio, bambini fra i 2 ed i 4 anni non sembrano essere in grado di implementare il controllo cognitivo di tipo proattivo, ma solo reattivo (Gonthier et al., 2019). Infatti, come dimostrato da Gonthier et al. (2019), l'utilizzo del controllo cognitivo proattivo inizia ad emergere gradualmente tra i 5 anni e i 10 anni di età (Diamond, 2020). Tuttavia, è interessante notare che, nonostante prima dei 10 anni la modalità di controllo privilegiata risulta essere quella reattiva, già a partire dai 5 anni i bambini sembrerebbero in grado di implementare in maniera proattiva il controllo cognitivo in condizioni in cui il suo utilizzo risulta particolarmente vantaggioso rispetto al controllo cognitivo reattivo (Chevalier et al., 2015). Ciò suggerisce che è possibile allenare e favorire modalità di controllo adattive già in età precoce. Infatti, un controllo cognitivo efficiente si basa sulla capacità di utilizzare in maniera flessibile queste diverse modalità di controllo in relazione all'occorrenza di cambiamenti ambientali (Braver, 2012). Questa concettualizzazione del controllo cognitivo come una funzione che si adatta a cambiamenti ambientali è coerente con la nuova visione del controllo cognitivo adattivo (Braem & Egner, 2018), che verrà discussa ampiamente in questo capitolo.

1.3.2 La prospettiva dell'apprendimento associativo sul controllo cognitivo

Classicamente, il controllo cognitivo viene attribuito ad un sistema supervisore di tipo dominio generale che viene reclutato in maniera volontaria e consapevole e che permette di mettere in atto risposte lente, ma strategiche (Braem & Egner, 2018). Per questo motivo, tradizionalmente, il controllo cognitivo è sempre stato contrapposto a meccanismi di apprendimento associativo (Norman & Shallice, 1986). Infatti, questi ultimi, permettono l'apprendimento di relazioni che occorrono fra differenti eventi e favoriscono la messa in atto di risposte veloci ed automatiche che vengono implementate in maniera inconscia ed involontaria. In particolare, l'apprendimento associativo comprende il condizionamento classico ed operante. Attraverso il condizionamento di tipo classico è possibile apprendere che ad un determinato evento ne segue sempre un altro; mentre, attraverso il condizionamento operante, è possibile apprendere che ad una risposta seguirà sempre una specifica conseguenza (Nolen-Hoeksema et al., 2014). Nonostante per lungo tempo il controllo cognitivo e l'apprendimento associativo siano stati considerati antitetici, recentemente è stata proposta l'ipotesi secondo cui il controllo cognitivo sarebbe in gran parte guidato anche da meccanismi associativi di base (Braem et al., 2019; Farooqui & Manly, 2015). Questa visione è coerente con studi recenti di

neuroimmagine (Duma et al., 2020) e comportamentali (Mento & Granziol, 2020). In particolare, la rassegna di Abrahamse et al. (2016) è di fondamentale importanza in quanto mette in luce che il controllo cognitivo è radicato nell'apprendimento associativo, come dimostrato dal fatto che il primo condivide le peculiari caratteristiche del secondo. Infatti, gli autori dimostrano che il controllo cognitivo presenta tre specifiche proprietà che caratterizzano l'apprendimento associativo: 1) l'operare in maniera contesto-specifica; 2) l'operare in assenza di consapevolezza e 3) l'essere sensibile a ricompense. Ad esempio, per quanto riguarda il controllo inibitorio, componente del controllo cognitivo a cui verrà prestata particolare attenzione in questo elaborato, alcuni studi (Bissett & Logan, 2012) sottolineano l'importanza della specificità del contesto per questa componente. In particolare, sembra che, in un compito di *stop-signal*, la performance dei soggetti migliori quando vengono presentati due *stop-signal* identici di seguito; tuttavia, questo incremento non occorre quando questi vengono presentati tramite modalità sensoriali differenti. Altri studi (Van Gaal et al., 2010) dimostrano che il controllo inibitorio può operare senza consapevolezza in quanto item di tipo NoGo presentati in maniera subliminale possono attivare *network* prefrontali inibitori ed influire negativamente sulla risposta, rallentandola. Infine, Boehler et al. (2012) mettono in luce che il controllo inibitorio presenta anche l'ultima delle tre proprietà fondamentali dell'apprendimento associativo, ossia la sensibilità alle ricompense, come dimostrato dal fatto che in un compito di tipo *Stop-signal* (Verbruggen & Logan, 2008), caratterizzato da uno *stop-signal* neutro e da uno *stop-signal* seguito da rinforzo, la performance migliora solo in seguito alla presentazione di questo ultimo tipo di segnale. Questa nuova visione rappresenta una vera e propria rivoluzione nell'ambito della psicologia cognitiva in quanto mette in crisi la tradizionale visione dicotomica che contrappone il controllo cognitivo all'apprendimento associativo, attribuendone il cuore operativo a sistemi indipendenti che guidano comportamenti complessi attraverso l'influenza reciproca di meccanismi di basso livello. A differenza del modello tradizionale di tipo *top-down*, questo nuovo modello implica che il controllo cognitivo sia una proprietà emergente sensibile alle caratteristiche dell'ambiente (Braem & Egner, 2018); per questo motivo, come già accennato, è stato introdotto l'utilizzo del termine controllo cognitivo adattivo. Il modello tradizionale e il più recente modello adattivo basato sull'apprendimento associativo sono posti a confronto nella figura 4.

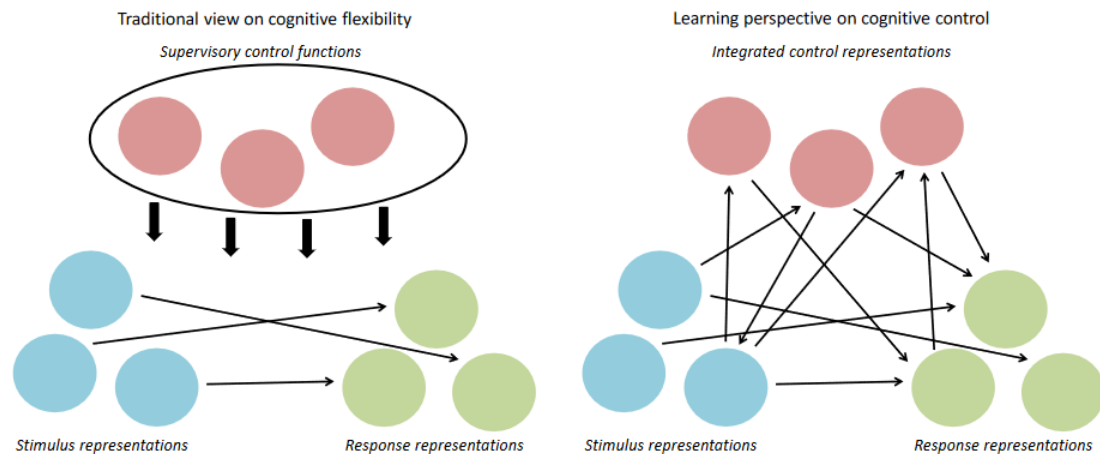


Figura 4: illustrazioni semplificate della visione tradizionale del controllo cognitivo a confronto con la prospettiva associativa del controllo cognitivo. Secondo la visione tradizionale (illustrazione a sinistra) associazioni di tipo stimolo-risposta sono supervisionate dalle funzioni del controllo cognitivo in maniera indipendente e *top-down*. Al contrario, la prospettiva associativa (illustrazione a destra) sostiene che il controllo cognitivo è integrato in *network* associativi di basso livello (Braem & Egner, 2018)

1.3.3 Come indagare il controllo cognitivo adattivo?

Braem et al. (2019) hanno individuato una serie di manipolazioni sperimentali che possono essere utilizzate al fine di investigare il controllo cognitivo adattivo. La prima manipolazione sperimentale che descriveremo, il *congruency sequence effect* (CSE), si basa sull'effetto di congruenza; quest'ultimo indica il fenomeno per cui, tipicamente, gli individui rispondono più lentamente ed in maniera meno accurata a prove incongruenti rispetto a prove congruenti in compiti di conflitto cognitivo (ad esempio, *Stroop task*, 1935). I compiti di conflitto cognitivo sono caratterizzati da una serie di prove, definite incongruenti, in cui ad istruzioni precise si contrappongono informazioni incongruenti che facilitano tendenze all'azione incompatibili con il compito da svolgere. Per esempio, il compito di *Stroop* (Stroop, 1935) è caratterizzato da una serie di prove in cui vengono presentate delle parole di colori, che possono essere tinte dello stesso colore espresso dal vocabolo o da uno differente: le prime prove vengono definite prove congruenti, mentre, le seconde incongruenti. Secondo il CSE l'effetto di congruenza è minore in seguito ad una prova incongruente: ciò significa che un soggetto risponde in maniera più veloce ed

accurata a prove incongruenti che seguono prove incongruenti piuttosto che prove congruenti (Egner, 2014; Duthoo et al., 2014). La misura del CSE riflette il livello di controllo cognitivo adattivo reclutato in risposta alla recente esperienza di incongruenza che, implicitamente, segnala *bottom-up* la necessità di maggiore controllo (Gonthier & Blaye, 2021). Quindi, ad un effetto di congruenza minore corrisponde un maggior reclutamento del controllo cognitivo (Braem et al. 2019). Un secondo modo per investigare il controllo cognitivo adattivo si basa sul *proportion congruency effect* (PCE) secondo cui l'effetto di congruenza è minore quando la maggior parte delle prove di un compito sono incongruenti. In particolare, tale effetto si può studiare mediante diverse manipolazioni sperimentali (Braem et al., 2019):

- 1) *list-wide proportion congruency effect* (LWPCE) secondo cui l'effetto di congruenza è minore in blocchi che sono caratterizzati da prove incongruenti maggiormente frequenti;
- 2) *item-specific proportion congruency effect* (ISPCE) secondo cui la misura dell'effetto di congruenza di uno specifico item varia rispetto a quanto frequentemente appare in prove incongruenti rispetto a prove congruenti;
- 3) *context-specific proportion congruency effect* (CSPCE) secondo cui l'effetto di congruenza cambia quando la proporzione di congruenza degli stimoli viene manipolata secondo due o più contesti. Tali contesti possono coinvolgere il colore degli stimoli, la sagoma che circonda gli stimoli oppure la posizione spaziale. Per esempio, se presentiamo una maggiore proporzione di prove incongruenti in una specifica posizione, tutte le prove presentate in tale posizione saranno caratterizzate da un effetto di congruenza minore. Il CSPCE si distingue dalle precedenti, LWPCE e ISPCE, poiché implica la manipolazione di aspetti che non sono rilevanti per il compito da svolgere (Gonthier & Blaye, 2021).

Solo recentemente, a partire dalla nuova concettualizzazione del controllo cognitivo come costruito dinamico ed incardinato nell'apprendimento associativo, è stato ipotizzato che il CSE, il LWPCE, l'ISPCE ed il CSPCE riflettano l'adattamento del controllo cognitivo (Braem et al., 2019). Tuttavia, questa proposta non viene accettata in maniera unanime da tutti gli studiosi dell'ambito; infatti, Schmidt (2019) ipotizza che questi effetti possono essere interamente ricondotti a meccanismi di puro apprendimento associativo più che a una modulazione adattiva del controllo cognitivo come suggerito da molteplici evidenze (Crump et al., 2017; Schmidt, 2019). Ciononostante, diversi studi sottolineano come meccanismi di apprendimento associativo non siano sufficienti a spiegare questi effetti

(Crump et al., 2017; King et al., 2012). Pertanto, al fine di approfondire il ruolo giocato dall'adattamento del controllo cognitivo all'interno dei fenomeni sperimentali sopra descritti (CSE, LWPCE, ISPCE e CSPCE), è necessario minimizzare sperimentalmente l'influenza dei meccanismi di apprendimento associativo. A tale scopo, Braem et al. (2019) hanno individuato una serie di strategie per poter investigare il controllo cognitivo adattivo, riducendo al minimo l'interferenza dovuta a meccanismi di apprendimento associativo. Gli autori propongono di investigare l'effetto dell'adattamento del controllo cognitivo sulla performance dei partecipanti tramite i cosiddetti *item diagnostici*, ossia item che non sono stati manipolati precedentemente e che, quindi, non possono essere influenzati da eventuali associazioni complesse che si sono create. Se viene rilevata in item diagnostici la presenza di CSE o del PCE, allora, si suppone sia presente l'influenza del controllo cognitivo adattivo in quanto è stata ridotta al minimo la possibile influenza dei meccanismi associativi di basso livello (Braem et al., 2019). Nonostante le ricerche che adottano queste strategie siano ancora agli albori, i primi risultati sembrano essere incoraggianti; in particolare, per quanto riguarda il CSCE, gli studi di Gonthier & Blaye (2021) dimostrano che questo effetto si trasferisce anche agli item diagnostici, suggerendo che già in età prescolare la prestazione dei bambini sembra essere meglio spiegata dall'adattamento del controllo cognitivo piuttosto che dall'apprendimento di associazioni complesse. Recentemente una rassegna di Chiu & Egner (2019) ha inoltre dimostrato come il controllo cognitivo adattivo possa associarsi non solo a stimoli contestuali esterni, come le caratteristiche fisiche dello stimolo, ma anche a contesti temporali che permettono di predire cambiamenti relativi alle richieste cognitive. Ad un livello più alto, queste evidenze sono coerenti con la recente teoria del *Predictive Coding* secondo cui l'essere umano è in grado di estrarre regolarità temporali dall'ambiente al fine di generare dei modelli predittivi interni della realtà che permettono di anticipare occorrenze ambientali (Clark, 2013).

Bambini in età prescolare presentano delle difficoltà in compiti che coinvolgono processi del controllo cognitivo di tipo esplicito, come accade, ad esempio, nel *Dimensional Change Card Sort* (Zelazo et al., 1995), in compiti di WM come il *backward digit span* (Gathercole et al., 2004) oppure nel *Marshmallow test* di Shoda e colleghi (1990). Al fine di comprendere se queste stesse difficoltà riguardano anche il controllo cognitivo adattivo, alcuni studi (Gonthier & Blaye, 2021; Gonthier et al., 2019) hanno indagato tramite le manipolazioni sperimentali CSPCE, LWPCE e ISPCE, il controllo cognitivo adattivo in bambini di questa età. In particolare, i recenti studi di Gonthier &

Blaye (2021) e di Gonthier et al. (2019), utilizzando tali manipolazioni, hanno dimostrato che bambini in età prescolare riescono ad adattare finemente il controllo cognitivo in maniera implicita. Queste evidenze sono estremamente importanti in quanto supportano l'esistenza di una dissociazione a livello funzionale del controllo cognitivo.

1.4 IL CERVELLO PREDITTIVO

Recentemente è stato dimostrato che è possibile utilizzare regolarità statistiche dell'ambiente al fine di anticipare in maniera implicita l'occorrenza di cambiamenti relativi alle richieste cognitive dell'ambiente (Chiu & Egner, 2019) e, conseguentemente, adattare il controllo cognitivo. Infatti, il controllo cognitivo, come già introdotto, viene definito adattivo in quanto si modifica, in maniera proattiva e dinamica, a cambiamenti esterni ed interni. Il concetto di controllo cognitivo adattivo è coerente con la recente teoria del *Predictive Coding* (Clark, 2013). Secondo tale ipotesi, infatti, è possibile, sulla base di regolarità spazio-temporali, generare modelli interni della realtà al fine di creare predizioni temporali rispetto all'ambiente: per questo motivo è stato introdotto il concetto di "cervello predittivo" (Clark, 2013).

1.4.1 Meccanismi di apprendimento implicito

La capacità di generare e usare predizione al fine di creare modelli interni del mondo è un principio di funzionamento cognitivo basato a sua volta sulla capacità di apprendere e usare informazioni dall'ambiente. L'apprendimento è un cambiamento relativamente permanente che avviene come risultato dell'esperienza (Nolen-Hoeksema, Fredrickson, Loftus & Lutz, 2014). A partire dall'epoca fetale l'essere umano dispone di una serie di meccanismi dominio-generalizzati innati di apprendimento implicito che plasmano e guidano le traiettorie evolutive di ciascuno (Valenza & Turati, 2017). Questi meccanismi possono essere di natura associativa e comprendono:

- lo *statistical learning* che permette di "individuare e rappresentare regolarità statistiche presenti all'interno di una sequenza temporale sulla base delle probabilità di co-occorrenza" (Valenza & Turati, 2019);
- il *rule learning* che consente di "rilevare la presenza di regolarità astratte sottostanti ad un insieme di stimoli e di generalizzare l'apprendimento di tali regole a materiale nuovo" (Valenza & Turati, 2019);
- la categorizzazione, ossia la capacità di cogliere le caratteristiche simili di stimoli percettivamente diversi (Valenza & Turati, 2019).

Come sostiene la recente teoria del *Predictive Coding* (Clark, 2013) questi meccanismi innati di apprendimento, che consentono di cogliere regolarità statistiche, permettono la creazione di modelli predittivi interni della realtà e, così, consentono l'adozione di specifici schemi comportamentali in diverse situazioni: tale meccanismo sembra essere alla base del controllo cognitivo adattivo. Infatti, Chiu & Egner (2019) mostrano che è possibile sfruttare le regolarità statistiche di un compito al fine di anticiparne le richieste cognitive per adattare, in maniera proattiva, il controllo cognitivo. Gli effetti sperimentali di congruenza precedentemente descritti sono un esempio a supporto di ciò (Chiu & Egner, 2019).

1.4.2 Predizioni temporali guidate da stimoli interni ed esterni

Tra i diversi meccanismi alla base di generare predizione e conseguentemente regolare in maniera proattiva il controllo cognitivo possiamo annoverare l'abilità di prevedere a livello temporale eventi rilevanti, fenomeno noto come predizione temporale (TP). La TP permette di ridurre l'incertezza riguardo al futuro e di ottimizzare il nostro comportamento. Predizioni temporali possono essere generate esternamente (E-TP) a partire da caratteristiche temporali degli stimoli che, ad esempio, possono derivare da regolarità delle strutture sensoriali o da segnali discreti che comunicano l'occorrenza di uno stimolo rilevante per il compito. In entrambi i casi, la possibilità di utilizzare le informazioni esterne al fine di predire l'arrivo degli eventi induce un orientamento dell'attenzione nel tempo (Coull & Nobre, 1998). Inoltre, una predizione temporale può emergere anche a partire da un processo guidato internamente (I-TP) (Mento & Tarantino, 2015). Un esempio di I-TP è rappresentato dal *foreperiod effect* (Niemi & Näätänen, 1981): secondo questo fenomeno i tempi di reazione di un individuo decrescono all'aumentare della durata dell'intervallo di tempo che precede la comparsa di uno stimolo in compiti in cui intervalli di tempo di diversa durata hanno le stesse probabilità di occorrenza. Questo effetto, detto *hazard function*, avviene poiché la probabilità di occorrenza di uno stimolo diventa condizionata all'accumularsi delle evidenze relative al fatto che lo stimolo non è ancora comparso; in altre parole, più passa il tempo più aumenta la probabilità che lo stimolo compaia (Niemi & Näätänen, 1981). Un altro esempio di I-TP è il *sequential effect* (SE), fenomeno per cui strutture temporali sperimentate precedentemente durante un compito permettono di predire l'occorrenza degli stimoli. Tale effetto è permesso dall'abilità umana, discussa ampiamente nel paragrafo precedente, di estrarre in maniera implicita regolarità statistiche degli eventi e di sfruttarle

per creare modelli predittivi interni (Clark, 2013). A livello evolutivo, questi meccanismi sembrano essere presenti in modo stabile a partire dai 6 anni, come dimostrato dalla presenza, già a questa età, dell'*hazard function* e dal fatto che i bambini beneficiano della presenza di *cue* che segnalano l'arrivo di stimoli rilevanti per il compito (controllo cognitivo proattivo). Tuttavia, sembra che solo a partire dagli 8 anni sia possibile utilizzare in maniera combinata entrambi i meccanismi (Mento & Tarantino, 2015).

1.4.3 Predizioni temporali guidate da caratteristiche locali e globali

La capacità di creare modelli predittivi rispetto all'occorrenza temporale di un determinato stimolo permette di adattare il controllo cognitivo ed il nostro comportamento motorio in una maniera proattiva; tale adattamento può essere plasmato in maniera *top-down* tramite istruzioni esplicite o in maniera *bottom-up*, grazie a fattori impliciti (Braem & Egner, 2018). Fra questi ultimi fattori, regolarità temporali locali e regolarità globali sembrano svolgere un ruolo importante nella generazione e nell'aggiornamento di modelli predittivi interni (Duma, Granziol & Mento, 2020). In particolare, viene utilizzato il termine predizione locale al fine di riferirsi all'aspettativa indotta da probabilità transitorie e circoscritte che non richiedono una conoscenza statistica a lungo termine (ad esempio, l'*hazard function*); al contrario, il concetto di predizione globale fa riferimento alla capacità di estrarre regole di alto livello, non adiacenti, che non tengono conto di probabilità locali (Mento & Granziol, 2020) quali, ad esempio, la distribuzione probabilistica delle durate degli intervalli di tempo lungo un compito. Infatti, si reagisce più velocemente ad intervalli brevi quando questi sono globalmente più frequenti all'interno dell'intero blocco rispetto a intervalli lunghi (Los et al., 2017). A livello evolutivo Mento & Granziol (2020), attraverso il *Dynamic Temporal Prediction Task* (DTP), compito sperimentale che permette di investigare l'adattamento del controllo cognitivo a predizioni globali e locali, mostrano che predizioni effettuate sulla base di elementi locali sono stabili già a partire dai 5 anni. Al contrario, la capacità di effettuare predizioni globali va incontro a profondi cambiamenti nel corso dello sviluppo; bambini di 5 e 6 anni, infatti, in confronto a soggetti meno giovani, sembrano trarre maggiore vantaggio in termini di velocità da predizioni globali, ossia presentano tempi di reazione più veloci in blocchi caratterizzati da più frequenti intervalli brevi. Tuttavia, questo vantaggio presente nei bambini più piccoli avviene a spese dei meccanismi di inibizione (numero superiore di risposte premature). Successivamente questa migliore performance diminuisce e diviene stabile a partire dai 7 anni di età.

Questa dissociazione evolutiva nella generazione implicita di aspettative temporali sulla base di regole locali e globali potrebbe supportare l'idea che l'abilità di creare predizioni locali precede, a livello ontogenetico, l'abilità di creare predizioni globali, potenzialmente più complesse da estrarre e utilizzare.

A livello neuropsicologico, uno studio di neuroimmagine di Duma e colleghi (2020) individua tre stadi computazionali che sottendono l'adattamento del controllo motorio proattivo che avviene sulla base di predizioni globali. Questi sono:

- l'*expectancy implementation*, stadio che riflette l'utilizzo di aspettative temporali. Questa componente si associa all'attività neurale della CNV, un potenziale evento-relato che riflette i processi di preparazione anticipatoria (Mento et al., 2017);
- la *response implementation*, uno stadio che riflette l'allocazione anticipatoria di risorse motorie ed attentive. Questa componente, invece, si associa all'attività neurale della P3, potenziale evento-relato che si presenta in caso di eventi prevedibili (Mento et al., 2017);
- l'*expectancy violation*, uno stadio che subentra nel momento in cui viene sperimentato un errore di predizione. Sembra che questo stadio computazionale si associ ad una generale attivazione del sistema di *alerting* che segnala la necessità di adattare il modello predittivo interno e di inibire lo schema precedentemente attivato (Duma, Granziol & Mento, 2020).

Questi risultati (Duma, Granziol & Mento, 2020; Mento & Granziol, 2020) non solo corroborano la visione del controllo cognitivo di Braem & Egner (2018), ma mostrano come sia possibile studiare a livello comportamentale e neurale l'adattamento proattivo del controllo cognitivo e del comportamento motorio che avviene sulla base di predizioni globali e locali. L'abilità di anticipare occorrenze ambientali è estremamente importante per la messa in atto di comportamenti adattivi (Nobre et al., 2007) e, per questo motivo, è stata indagata in diverse tipologie di ricerche: studi evolutivi, di neuroimmagine, comportamentali e così via. D'Souza et al. (2016) ipotizzano che tale abilità sia compromessa in diversi disturbi del neurosviluppo, come, ad esempio, nel Disturbo dello Spettro dell'Autismo (ASD) o nel Disturbo da Deficit di Attenzione e di Iperattività (ADHD), sottolineando, così, la necessità di investigare il controllo cognitivo adattivo sulla base di predizione temporali anche in queste popolazioni cliniche. In particolare, studi successivi potrebbero indagare non solo come il controllo cognitivo adattivo si

modifica in relazione a predizioni globali e locali, ma se quest'adattamento possa
occorrere in maniera flessibile al variare di regole predittive nel tempo.

2. DISTURBO DELLO SPETTRO DELL'AUTISMO (ASD)

2.1 CRITERI DIAGNOSTICI, MANIFESTAZIONI E CARATTERISTICHE CLINICHE

Il Disturbo dello Spettro dell'Autismo (ASD) è un disturbo del neurosviluppo a eziologia multifattoriale, caratterizzato da deficit nell'interazione sociale, nella comunicazione verbale e non verbale e dalla presenza di comportamenti ripetitivi ed interessi ristretti e stereotipati (OMS, 1992). In ambito clinico e di ricerca, è presente un acceso dibattito rispetto alle modalità con cui riferirsi a persone con una diagnosi di ASD (Williams et al., 2008; Kenny et al., 2016). Inizialmente, infatti, i movimenti per i diritti delle persone disabili sostenevano l'importanza di utilizzare un linguaggio che ponesse le persone prima delle proprie disabilità; venivano adottate, quindi, espressioni come "persona con autismo". Recentemente, però, è stato sottolineato come queste modalità di linguaggio possano descrivere le disabilità in maniera negativa, relegando queste condizioni ad un qualcosa che può essere curato o rimosso dalla persona. La maggior parte dei membri della comunità autistica, ad esempio, ritengono che l'autismo non sia separato dalla persona, ma che sia parte integrante dell'identità di un individuo: per questo motivo, vengono preferite espressioni come "autistico/a" o "persona autistica". Per questo motivo, nel seguente elaborato utilizzeremo tali espressioni al fine di fare riferimento a persone con diagnosi di ASD. Recentemente, le stime di prevalenza dell'ASD sono aumentate notevolmente (Fombonne, 2009), favorendo l'incremento dell'interesse per tale disturbo; infatti, l'ASD, ad ora, rappresenta il disturbo del neurosviluppo più diffuso negli Stati Uniti di America: si stima che 1 bambino su 68 sia autistico. Tuttavia, non è chiaro se questi dati riflettano un effettivo aumento del tasso di incidenza del disturbo oppure se siano dovuti alla maggiore definizione dei criteri diagnostici, alla diffusione di nuovi strumenti di valutazione standardizzati e all'aumentata sensibilità da parte della popolazione e dei clinici verso le caratteristiche dell'ASD (Tambelli, 2017). Questo disturbo riguarda più frequentemente il sesso maschile, con una probabilità quattro volte superiore rispetto alle donne (Zero to Three, 2016). Al fine di comprendere pienamente l'ASD è fondamentale delineare come tale disturbo, nel corso della storia, sia stato concettualizzato in maniera differente nel Manuale Diagnostico e Statistico dei disturbi mentali (DSM). Infatti, inizialmente, la quarta edizione del manuale, il DSM-IV, includeva questo disturbo nell'ampia categoria dei Disturbi Pervasivi dello Sviluppo, che comprendeva: il Disturbo Autistico, la sindrome di Asperger, il Disturbo Disintegrativo dello Sviluppo ed il Disturbo Pervasivo dello Sviluppo non meglio specificato. Poiché

questi quadri clinici presentavano svariate sovrapposizioni e condividevano molteplici somiglianze, si è convenuto che fosse maggiormente corretto ricondurli, a livello concettuale, ad un'unica etichetta nosografica. Per questo motivo, la nuova edizione del manuale, il DSM-5, non presenta queste singole categorie diagnostiche ma comprende solamente il Disturbo dello Spettro dell'Autismo (ASD). Questa nuova etichetta nosografica tiene conto di un numero molto più ampio di sintomi che si sviluppano in maniera dimensionale e, per questo motivo, consente di includere un maggior numero di casi clinici rispetto al DSM-IV (Wicks-Nelson & Israel, 2009); in questo modo, soggetti in difficoltà che non presenterebbero limitazioni funzionali tali da ricevere una diagnosi secondo i criteri delle edizioni precedenti del DSM possono ricevere la diagnosi di ASD e, di conseguenza, il supporto terapeutico ed assistenziale di cui hanno bisogno. L'aspetto di maggiore innovazione portato da questa ultima edizione del DSM riguarda proprio il cosiddetto modello dello spettro che permette di racchiudere una costellazione di sintomi all'interno di un'unica categoria nosografica "che viene adattata in senso dimensionale alle peculiari manifestazioni cliniche individuali, agli indicatori clinici (es. livello di gravità) ed alle caratteristiche associate (es. presenza di disabilità intellettiva) del singolo" (Tambelli, 2017).

2.1.1 Alterazioni nel dominio sociocomunicativo e nel dominio dei comportamenti ristretti e stereotipati

Secondo il DSM-5 (APA, 2013) i principali sintomi dell'ASD coinvolgono due domini: l'ambito sociocomunicativo e l'ambito relativo ai comportamenti ristretti e stereotipati. Per quanto riguarda il primo, le caratteristiche cliniche di questa popolazione si manifestano in maniera differente da persona a persona in base all'età, al livello intellettivo ed alle capacità di linguaggio di ciascuno. Ad esempio, deficit comunicativi possono comprendere lievi difficoltà nella capacità discorsiva, ma anche scarsa comprensione del discorso, ecolalia o, nei casi più gravi, mancato sviluppo del linguaggio parlato (Dawson & Toth, 2006). Alcuni indicatori precoci relativi all'ambito sociocomunicativo emergono già a partire dai 6 mesi e permettono di distinguere bambini ad alto rischio di sviluppare ASD da bambini a basso rischio (Tambelli, 2017). Per esempio, sembra che bambini ad alto rischio utilizzino meno frequentemente gesti di tipo proto-dichiarativo per condividere con l'altro l'interesse verso elementi presenti nell'ambiente; altre evidenze suggeriscono che bambini fra i 6 ed i 24 mesi di età, a cui verrà successivamente diagnosticato l'ASD, guardano meno frequentemente negli occhi

altri individui (Thorup et al., 2016). Tuttavia, la presenza di comportamenti atipici viene chiaramente osservata solo a partire dai 2 o dai 3 anni di vita del bambino; per esempio, i bambini non ricambiano lo sguardo dei genitori, non rispondono quando vengono chiamati per nome oppure non ricambiano i sorrisi (Valenza & Turati, 2017). Per quanto riguarda il dominio dei comportamenti ristretti e stereotipati, Mirenda et al. (2010) hanno individuato due differenti modalità attraverso cui questi si possono manifestare: in primo luogo, possono essere messe in atto azioni sensori-motorie ripetitive semplici come volteggiare, battere le mani, usare in maniera insolita gli oggetti e così via; oppure, possono manifestarsi comportamenti ripetitivi complessi, per esempio persone autistiche possono divenire assorbite da peculiari e ristrette passioni o possono aderire in maniera rigida a routine ripetitive (Wicks-Nelson & Israel, 2009). A livello evolutivo, è più difficile individuare indicatori precoci relativi a questo dominio poiché tutti i bambini, durante i loro primi anni di vita, mettono in atto comportamenti ripetitivi e routine ritualizzate che diminuiscono entro i 4 anni. Nel caso dell'ASD, invece, questi comportamenti ripetitivi tendono ad aumentare in maniera costante (Leekam et al., 2007).

2.2 MODELLI ESPLICATIVI E NEUROPSICOLOGICI DELL'ASD

2.2.1 L'influenza della genetica

A partire dagli anni 70 e 80 sono stati condotti studi empirici che hanno dimostrato che l'eziologia dell'ASD è genetica e neurobiologica. Studi familiari e studi condotti su gemelli, infatti, hanno rilevato che tassi di concordanza fra gemelli monozigoti sono pari all'82-92% rispetto all'1-10% rilevato in gemelli dizigoti; inoltre, le stime di ereditabilità possono raggiungere livelli pari al 90% (Folstein, & Rosen-Shedley, 2001). Queste evidenze hanno permesso di superare alcune teorie semplicistiche e non scientificamente fondate che attribuivano meramente a fattori ambientali la causa dell'ASD, come, ad esempio, l'ipotesi della madre frigorifero (Bettelheim, 1967) o le teorie dei vaccini (Wakefield et al., 1998, ritirato). Tuttavia, è importante sottolineare che, coerentemente con il modello transazionale di Sameroff (2009), le conseguenze dello sviluppo sono il risultato delle interazioni che occorrono sia fra fattori genetici che fra fattori ambientali. Secondo la visione neuro-costruttivista (Oliver et al., 2000), infatti, le traiettorie di sviluppo sia tipiche sia atipiche, come nel caso dell'ASD, possono caratterizzarsi per differenze iniziali che risultano in esiti evolutivi simili oppure estremamente differenti a causa del ruolo giocato dai fattori ambientali.

2.2.2 Modelli dominio-generalisti e dominio-specifici

Diversi modelli neuropsicologici hanno tentato di spiegare tale disturbo ipotizzando la presenza di una compromissione, a livello di meccanismi di base, che influenza a cascata i diversi domini atipici dell'ASD. Questi modelli possono essere suddivisi in due tipologie: i modelli dominio specifici, secondo cui lo sviluppo di questo disturbo deriva da deficit cognitivi di base che sono estremamente selettivi, e modelli dominio-generalisti, che sostengono l'esistenza di compromissioni meno specifiche (Vicari & Caselli, 2017). Il modello della compromissione della teoria della mente (TOM) di Baron-Cohen (1993,1995) rappresenta uno dei più importanti modelli dominio specifici dell'ASD: secondo l'autore, alla base di questo disturbo è presente una compromissione della capacità di mentalizzazione, un'abilità che permette di comprendere i propri ed altrui stati mentali. Tale capacità permette di assumere il punto di vista delle altre persone e, per questo motivo, è fondamentale per interagire con gli altri (Wicks-Nelson & Israel, 2009). Oltre ad essere corroborata da diverse evidenze comportamentali e studi di neuroimmagine (Pelphrey et al., 2011), questa teoria è coerente con la traiettoria evolutiva atipica della cognizione sociale che caratterizza questo disturbo in maniera specifica; infatti, l'ASD si differenzia dagli altri disturbi a causa dell'insorgenza precoce di questo deficit. Questa teoria, tuttavia, presenta anche una serie di limitazioni. In primo luogo, questo deficit non sembra essere specifico ed universale nell'ASD, come dimostrato dal fatto che non tutte le persone autistiche presentano una compromissione della TOM (Buitelaar et al., 1999); in secondo luogo, questa teoria non permette di spiegare in maniera esaustiva le diverse caratteristiche cliniche dell'ASD (van der Cruys et al., 2014), come, ad esempio, le anomalie relative al dominio dei comportamenti ristretti e stereotipati. Un modello di tipo dominio-generale, denominato "deficit delle funzioni esecutive" (Damasio & Maurer, 1978), teorizza che alla base dell'ASD siano presenti difficoltà neuropsicologiche più generali che coinvolgono il controllo cognitivo; questo è supportato dal fatto che persone autistiche presentano caratteristiche simili a quelle trovate in pazienti con lesione frontale (Vicari & Caselli, 2017). Ciononostante, studi che hanno indagato il controllo cognitivo nell'ASD hanno ottenuto risultati contrastanti. Infatti, mentre alcune evidenze (Pennington & Ozonoff, 1996, Solomon et al., 2008) supportano la presenza di una compromissione generale a carico del controllo cognitivo, alcuni studi sia comportamentali (Hogeveen, Krug, Elliot, Carter & Solomon, 2018; Happe et al., 2016) che neurali (Ambrosino et al., 2014) non individuano alcun deficit o atipicità a livello strutturale e funzionale nei *network* che sottendono il controllo

cognitivo. Inoltre, tale compromissione non sarebbe specifica dell'ASD ma sarebbe trasversalmente presente in molti disturbi del neurosviluppo, come ad esempio nel Disturbo da Deficit di Attenzione e Iperattività (ADHD).

Un altro modello di tipo dominio-generale, denominato “debolezza della coerenza centrale” (Frith & Happè, 1994), teorizza che le persone autistiche siano caratterizzate da una modalità preferenziale di elaborazione delle informazioni di tipo locale che occorre a discapito di una modalità di elaborazione di tipo globale. Comunemente, infatti, le informazioni vengono elaborate in maniera globale al fine di dare un significato agli stimoli, inserendoli all'interno di un contesto più ampio; questa tendenza, definita della coerenza centrale, può essere più o meno forte negli individui. Frith & Happè (1994) propongono che nell'ASD sia presente una tendenza ad elaborare le informazioni in maniera più analitica, concentrandosi su specifiche componenti degli stimoli piuttosto che integrando le informazioni in un intero (Wicks-Nelson & Israel, 2009). Per tale motivo, ad esempio, individui autistici presenterebbero una performance migliore rispetto a persone neurotipiche nel compito del Disegno coi Cubi della WISC a supporto del fatto che elaborando gli stimoli in maniera locale riescono con maggiore facilità a ricostruire le singole parti dell'immagine (Shah & Frith, 1993). Il *test* di Navon, utilizzato per investigare la coerenza centrale, permette di chiarire meglio la differenza fra elaborazione locale ed elaborazione globale. Prendendo come esempio un item del *test* di Navon proposto in figura 5, le persone che elaborano le informazioni in modo globale riportano di percepire in prima istanza la lettera S; al contrario, individui che adottano un'elaborazione di tipo locale riportano di percepire in maniera più saliente la lettera H.

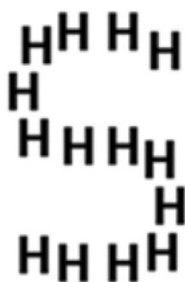


Figura 5: esempio di item del *test* di Navon.

Questa teoria permette di spiegare alcune caratteristiche cliniche dell'ASD come l'ipo o iperreattività sensoriale, le elevate capacità percettive oppure l'insolito interesse per alcune peculiari caratteristiche sensoriali dell'ambiente (Vicari & Caselli, 2017). Ciononostante, anche questo modello è limitato dal fatto che il deficit di elaborazione non

sembra essere presente in maniera universale e specifica nell'ASD. È interessante però sottolineare come rispetto alle precedenti, quest'ultima teoria è in linea con alcuni recenti modelli neuropsicologici dell'ASD che si basano sul concetto di cervello predittivo introdotto nel capitolo precedente (Pellicano & Burr, 2012; Sinha et al., 2014; Lawson, Rees & Friston, 2014; van der Cruys et al., 2014); infatti, queste teorie sostengono la presenza di una compromissione, in questa popolazione clinica, nella creazione e nell'aggiornamento di modelli predittivi interni. La costruzione di questi è permessa dalla capacità dell'essere umano di cogliere regolarità statistiche nell'ambiente e di integrarle in uno schema predittivo; ne consegue che la tendenza delle persone autistiche ad elaborare gli stimoli in maniera locale senza integrarli a livello globale potrebbe influenzare negativamente le capacità predittive di questa popolazione clinica.

2.3 I MODELLI PREDITTIVI DELL'ASD

Una recente ipotesi propone che le difficoltà di adattamento e le differenze fenotipiche presenti nell'ASD derivino da una difficoltà nel creare ed utilizzare modelli predittivi per generare aspettative relative all'ambiente (Pellicano & Burr, 2012; Sinha et al., 2014; Lawson, Rees & Friston, 2014; van der Cruys et al., 2014). Una recente rassegna (Cannon et al., 2021) divide i differenti modelli a sostegno di questa ipotesi sulla base del deficit individuato come disfunzionale nell'ASD. Per esempio, lo studio di Sinha et al. (2014) ritiene che alla base dell'ASD sia presente una compromissione dei meccanismi di apprendimento di eventi probabilistici che sono necessari alla costruzione di modelli predittivi. Le evidenze neurali di Zwartz et al. (2017), coerentemente con l'ipotesi di Sinha et al. (2014), suggeriscono che persone autistiche utilizzino strategie differenti per generare i propri modelli predittivi; infatti, a livello comportamentale esse sarebbero in grado di apprendere associazioni probabilistiche (D'Cruz et al., 2013) e regolarità statistiche (Brown, Aczel, Jimenez, Kaufman & Grant, 2010) in maniera implicita. Si può pertanto ipotizzare che le persone autistiche abbiano trovato delle strategie comportamentali alternative che permettono di compensare meccanismi predittivi potenzialmente deficitari. Altri autori (Pellicano & Burr, 2012), al contrario, pongono l'attenzione sui processi coinvolti nel generare aspettative a partire da modelli predittivi. Per esempio, Pellicano & Burr (2012) ipotizzano che la conoscenza dell'ambiente che viene utilizzata per creare i modelli predittivi, sia minore nell'ASD; per questo motivo, questa popolazione presenta elevate difficoltà ad anticipare le richieste dell'ambiente. Una serie di teorie (Lawson et al., 2014; van der Cruys et al., 2014) hanno

riformulato tale ipotesi in accordo con la recente visione del *Predictive Coding* (Clark, 2013), sostenendo l'esistenza di una compromissione nel modulare la precisione degli errori di predizione. Al fine di comprendere al meglio queste teorie è necessario definire cosa sono gli errori di predizione e la loro precisione. Gli errori di predizione occorrono quando gli stimoli provenienti dall'ambiente esterno o da segnali interni non sono coerenti con i modelli predittivi creati. Secondo Friston (2010), ogni errore di predizione è caratterizzato da una specifica precisione. Questa caratteristica è elevata nel momento in cui nell'ambiente sono presenti regolarità statistiche da apprendere; in questi casi, gli errori di predizione permettono l'aggiornamento dei modelli predittivi. Al contrario, tale caratteristica è inferiore nel momento in cui l'errore di predizione individuato è spurio e, quindi, non informativo rispetto alla predicibilità dell'ambiente. La differenza fra errori caratterizzati da livelli di precisione elevati oppure modesti può essere compresa tramite dei meccanismi di meta-apprendimento che, secondo la teoria di van der Cruys et al. (2014), sono compromessi nell'ASD. In particolare, individui autistici sembrano sovrastimare la precisione degli errori di predizione. Se ogni errore di predizione è importante, è necessario ogni singola volta modificare il proprio modello della realtà; ne consegue che questa popolazione clinica tende ad aggiornare continuamente i propri schemi interni senza mai riuscire a definire precisi pattern predittivi della realtà stessa. Questa situazione caratterizza, in particolare modo, i contesti maggiormente incoerenti in cui è difficile che si presentino evidenze accumulate lungo il corso del tempo di specifiche regolarità (van der Cruys et al., 2014). Questa visione è coerente col fatto che persone autistiche, in compiti che richiedono associazioni rigide ed esatte, ottengono una performance migliore rispetto a persone neurotipiche (Motton et al., 2013). Inoltre, a livello neurale svariate evidenze (Thillay et al., 2016; Goris et al., 2018; Grisoni et al., 2019; Beker et al., 2021) individuano anomalie nei correlati neurali che sottendono i meccanismi predittivi. In particolare, i risultati di Thillay et al. (2016) supportano la teoria di van der Cruys et al. (2014) poiché individuano nell'ASD la presenza di un'anomala CNV (variazione negativa contingente), potenziale evento relato che rappresenta il substrato neurale dell'anticipazione di eventi basati su predizione (Feldman & Friston, 2010). Queste evidenze neurali suggeriscono la presenza di meccanismi predittivi atipici in questa popolazione; tuttavia, i discordanti dati comportamentali dimostrano che questo filone di ricerca richiede di essere approfondito ulteriormente.

2.4 ABILITÀ DI PREDIZIONE E CARATTERISTICHE FENOTIPICHE NELL'ASD

La teoria di van der Cruys et al. (2014) permette di spiegare diverse caratteristiche fenotipiche dell'ASD, compresi i deficit relativi alla teoria della mente, alla coerenza centrale ed al controllo cognitivo. In primo luogo, secondo tale visione, il cosiddetto "ritiro autistico" (Kanner, 1943) deriva dalla necessità di allontanarsi da un mondo estremamente complesso in quanto ricco di eventi inaspettati che non possono essere predetti. Anche i cosiddetti "isolotti di capacità" (Kanner, 1943) sono spiegabili tramite questa nuova visione; infatti, lo sviluppo di eccezionali abilità in specifici ambiti è estremamente motivante per questa popolazione clinica in quanto permette loro di avere maggiore controllo in un mondo incontrollabile. In aggiunta, sembra che anche le compromissioni sociocomunicative e le caratteristiche relative al dominio dei comportamenti ristretti e stereotipati possano essere spiegate dalla teoria di van der Cruys et al. (2014). In primo luogo, infatti, atipie nell'ambito sociocomunicativo potrebbero derivare dall'estrema dinamicità degli ambienti sociali che amplificano la difficoltà presente nell'ASD di individuare informazioni salienti per la creazione di modelli predittivi; inoltre, stereotipie e comportamenti ripetitivi potrebbero rappresentare delle strategie adottate per gestire la percezione di una realtà imprevedibile ed in continuo mutamento.

2.4.1 Abilità di predizione ed elaborazione percettiva degli stimoli nell'ASD

Come già accennato, persone autistiche tendono ad elaborare gli stimoli in maniera locale piuttosto che attraverso una modalità globale (Frith & Happè, 1994); tuttavia, definire le persone autistiche meramente come elaboratori locali sarebbe eccessivamente riduttivo e semplicistico, oltre ad essere incoerente con i risultati di D'Souza et al. (2016). Una spiegazione più complessa viene proposta da van der Cruys et al. (2014): l'autore propone che nell'ASD sia presente una difficoltà nell'estrarre caratteristiche globali degli stimoli in quanto, data l'elevata inflessibilità della precisione degli errori di predizione, questa popolazione clinica tende a porre la propria attenzione a stimoli di basso livello estremamente concreti ed irrilevanti. Questa ipotesi è sostenuta da studi di neuroimmagine che mostrano come cervelli autistici siano perfettamente in grado di rilevare cambiamenti che occorrono a livello locale, come ad esempio l'occorrenza di infrequenti cambiamenti di timbro (Ferri et al., 2003), ma presentino delle difficoltà nell'individuare cambiamenti a livello globale (van der Cruys et al., 2014),

come ad esempio caratteristiche fonetiche del discorso (Lepisto et al., 2006). Infatti, questa popolazione clinica, all'occorrenza di stimoli infrequenti che si presentano a livello locale, presenta una più ampia *mismatch negativity* (MMN), risposta elettrofisiologica associata alla verifica dell'errore rispetto al modello sensoriale generato internamente. Queste evidenze suggeriscono una maggiore sensibilità di questa popolazione clinica nella rilevazione di aspetti locali degli stimoli in quanto questo potenziale evento relato si associa alla violazione di una predizione (Wacongne et al., 2012). Inoltre, persone autistiche, all'occorrenza di cambiamenti che avvengono a livello globale, presentano una P3 di minore ampiezza, risposta elettrofisiologica associata all'integrazione delle informazioni nuove all'interno del modello interno. Ciò supporta la presenza di una difficoltà nell'integrazione globale degli stimoli in quanto questo potenziale evento relato si associa alla violazione di aspettative che occorrono ad un livello globale (Kemner et al., 1995).

2.4.2 Abilità di predizione e dominio cognitivo nell'ASD

L'ASD, oltre ad essere caratterizzato da una serie di compromissioni nel dominio sociocomunicativo e da comportamenti ristretti e stereotipati, è contraddistinto anche da una serie di atipie nell'ambito cognitivo e percettivo. Per esempio, individui autistici sembrano presentare un'attenzione iper-selettiva ed una difficoltà nel disancorare l'attenzione (Keehn et al., 2009). Queste caratteristiche possono essere spiegate dalla visione di van der Cruys et al. (2014) come conseguenze della precisione degli errori di predizione che comporta un allungamento dei tempi di elaborazione delle informazioni in entrata; questa spiegazione è coerente con gli elevati di tempi di reazione che caratterizzano questa popolazione clinica. È importante sottolineare che alcuni individui autistici potrebbero rimpiazzare questa iper-selettività con una reattività ridotta e con comportamenti di evitamento (van der Cruys et al., 2014) al fine di adattarsi in maniera strategica all'elevata inflessibilità degli errori di predizione. Questa visione permette di chiarire come mai persone autistiche possono presentare sia un'ipersensibilità che un'iposensibilità sensoriale rispetto all'ambiente circostante (APA, 2013).

Le difficoltà nel filtrare informazioni irrilevanti a favore di informazioni rilevanti conducono inevitabilmente a problematiche più ampie nel dominio cognitivo. Nonostante i dati contrastanti riportati dalla letteratura rispetto alla presenza o meno di un deficit relativo al controllo cognitivo (Solomon et al., 2008; Pennington & Ozonoff, 1996; Hogeveen et al., 2018; Happe et al., 2016), svariati studi individuano, nell'ASD, una

performance deficitaria al WCST (Geurts, Corbett & Solomon, 2009) che potrebbe essere potenzialmente dovuta alla mancanza di informazioni esplicite riguardo alla regola da adottare ed al momento in cui cambiare tale regola (van der Cruys et al., 2014). Questa ipotesi sembra essere supportata da White, Burgess & Hill (2009) che dimostrano come persone autistiche, in compiti caratterizzati da maggiore libertà nelle strategie da adottare, hanno maggiori difficoltà rispetto a compiti più strutturati e rigidi. Tali difficoltà nel controllo cognitivo e, più nello specifico, nella flessibilità cognitiva non sono dovute alla compromissione di meccanismi di apprendimento implicito, come dall'abilità di apprendere regolarità statistiche, che sembrano essere preservati (Brown et al., 2010); ma, piuttosto, queste difficoltà sembrano essere dovute a deficit nell'aggiornare il valore predittivo degli stimoli, come dimostrato dal fatto che persone autistiche, in un compito di *probabilistic reversal learning*, tendono a mettere in atto la risposta o regola imparata inizialmente anche quando questa non è più corretta (D'Cruz et al., 2013). In generale, le evidenze di D'Cruz et al. (2013) supportano l'idea che i meccanismi di apprendimento dei modelli predittivi siano preservati e che i meccanismi di predizione e di aggiornamento di tali modelli siano compromessi. Alla luce di questi risultati, van der Cruys et al. (2014) predicono che, in quelle situazioni in cui la predicibilità di uno stimolo, ossia il contesto probabilistico, cambia fra i diversi blocchi di un compito, persone autistiche presentano una performance deficitaria.

Riassumendo, l'introduzione del concetto di controllo cognitivo adattivo (Braem & Egner, 2018; Braem et al., 2019) è in linea con una moltitudine di studi che hanno tentato di indagare come tale costrutto si modifica in relazione a predizioni temporali in popolazioni con traiettorie evolutive tipiche ed atipiche. Questo elaborato ha lo scopo di studiare come il controllo cognitivo si adatta, in maniera flessibile, al variare di predizioni locali e globali in bambini con diagnosi di ASD. Tale ricerca è estremamente innovativa non solo perché studia una proprietà del controllo cognitivo ancora poco conosciuta in letteratura, ma anche perché fornisce una prospettiva alternativa allo studio di un aspetto considerato disfunzionale nell'ASD. Infatti, sulla base del recente modello di van der Cruys et al. (2014), che teorizza la presenza di una compromissione a carico delle capacità predittive nell'ASD, ipotizziamo che questa popolazione clinica presenti delle difficoltà nell'adattare in maniera proattiva e flessibile il controllo cognitivo al variare del contesto. Questa competenza, infatti, avviene grazie alla capacità umana di generare modelli predittivi della realtà, sulla base di regolarità spazio-temporali, che permettono di predire occorrenze ambientali e, di conseguenza, agire in maniera proattiva. Per questo motivo,

difficoltà a livello predittivo potrebbero avere delle ricadute negative nel controllo cognitivo adattivo.

3. LA RICERCA

In questo capitolo viene descritta la ricerca oggetto del presente elaborato. Nel primo paragrafo vengono illustrati gli obiettivi del presente studio; nel secondo paragrafo viene presentato il metodo adottato per condurre la ricerca; nel terzo paragrafo, invece, vengono esposte le ipotesi sperimentali. Infine, si conclude riportando le analisi dei dati.

3.1 OBIETTIVI

L'essere umano, tramite il meccanismo dello *statistical learning*, è in grado di generare modelli predittivi interni della realtà a partire da regolarità spazio-temporali presenti nell'ambiente. Questi modelli consentono la creazione di aspettative temporali rispetto alle richieste ambientali imminenti che guidano l'adattamento del controllo cognitivo alle variazioni del contesto. Il presente elaborato di ricerca si propone di indagare come il controllo cognitivo e, specificatamente, il controllo inibitorio, sia influenzato da aspettative temporali implicite nel Disturbo dello Spettro dell'Autismo (ASD). In questa popolazione clinica, la capacità di creare modelli predittivi sulla base di informazioni ambientali implicite sembra essere preservata; tuttavia, sembra essere presente una difficoltà nell'aggiornamento dei modelli generati. Ci si attende, di conseguenza, che i soggetti appartenenti al gruppo ASD presentino una difficoltà nell'adattare il proprio controllo cognitivo a variazioni probabilistiche del contesto: questa limitazione si rifletterebbe in una peggiore performance a livello comportamentale in compiti predittivi. Tale ipotesi è coerente con una serie di modelli neuropsicologici dell'ASD (Pellicano & Burr, 2012; Sinha et al., 2014; Friston, 2014; van der Cruys et al., 2014) che sostengono la presenza di meccanismi predittivi deficitari in questa popolazione clinica, come supportato da numerosi studi di neuroimmagine (Thillay et al., 2016; Goris et al., 2018; Grisoni et al., 2019; Beker et al., 2021). Questo fenomeno, tuttavia, richiede di essere ulteriormente approfondito a causa delle discordanti evidenze ottenute da studi comportamentali (Amoruso et al., 2019; Knight et al., 2020; Beker et al., 2021).

3.2 METODO

3.2.1 Soggetti

Hanno partecipato volontariamente all'esperimento 55 soggetti (6 femmine e 49 maschi); di questi, sono stati inclusi nel campione finale della ricerca 51 bambini di età

compresa tra i 6 e i 15 anni (età media = 10,6, ds = 2,4; si veda tabella 1). I soggetti sono stati selezionati in modo tale da risultare suddivisi in due gruppi: un gruppo costituito da soggetti con diagnosi di Disturbo dello Spettro dell'Autismo (ASD; n = 25) ed un gruppo di controllo costituito da soggetti a sviluppo tipico (TD; n = 25). I soggetti, come osservabile in tabella 1, sono stati suddivisi per cluster di età:

- bambini (6-8 anni)
- preadolescenti (9-11 anni)
- adolescenti (12-15 anni)

	Gruppo	Età media ± ds (range)	Maschi	Femmine	N
TD	Bambini	7,8 ± 0,4 (7-8)	4	2	6
	Preadolescenti	10,4 ± 0,9 (9-11)	10	0	10
	Adolescenti	13,2 ± 0,9 (12-15)	8	1	9
ASD	Bambini	7,3 ± 0,9 (6-8)	5	2	7
	Preadolescenti	10 ± 0,6 (9-11)	10	0	10
	Adolescenti	13,1 ± 1 (12-15)	9	0	9
TOTALE		10,6 ± 2,4 (6-15)	46	5	51

Tabella 1: principali statistiche descrittive del campione.

I soggetti del gruppo ASD sono stati reclutati presso lo studio multidisciplinare “La Fenice” di Noale (Venezia) e presso l’ambulatorio per l’autismo del centro “Opera Santa Rita Onlus” (Prato); il gruppo di controllo, invece, è stato reclutato presso la Scuola Primaria “Pio X” di Tavo (Padova) e presso l’Istituto Comprensivo “Bonaccorso da Montemagno” di Quarrata (Pistoia). I criteri di inclusione per la ricerca erano un quoziente di intelligenza non verbale nella norma, che è stato misurato tramite le Matrici Progressive Colorate di Raven (Raven & Court, 1938), e assenza di deficit sensoriali, quadri sindromici, malattie neurologiche (ad esempio, epilessia) o altri disturbi psichiatrici. Inoltre, sono stati esclusi tutti i soggetti che presentavano altri disturbi del neurosviluppo in comorbidità con l’ASD, come l’ADHD (n = 1). Il gruppo di controllo è stato appaiato per età, sesso e classe frequentata al gruppo ASD. Tutti i partecipanti inclusi avevano una vista normale o corretta.

3.2.2 Conformità etica

I genitori dei/le bambini/e che hanno preso parte alla ricerca hanno fornito il loro consenso scritto mentre i/le bambini/e hanno fornito il loro assenso orale alla partecipazione. Tutte le procedure sperimentali sono state approvate dal Comitato Etico

della Scuola di Psicologia dell'Università di Padova (protocollo n. 3666) e sono state condotte secondo i principi espressi dalla Dichiarazione di Helsinki.

3.2.3 Strumenti

3.2.3.1 *Dynamic Temporal Prediction Task Go No-Go* (Mento et al., in prep.)

Il protocollo sperimentale ha previsto la somministrazione, grazie all'ausilio del software *Open Sesame* (Mathôt et al., 2012), della *Padua Adaptive Cognitive Control Battery for Children* (PACC; Mento & Tarantino, in prep.), una batteria computerizzata che permette di indagare il controllo cognitivo adattivo. La batteria PACC (Mento & Tarantino, in prep) è costituita da cinque prove che possono essere somministrate singolarmente o in sequenza:

- *Dynamic Temporal Prediction Task* (DTP; Mento & Granziol, 2020)
- *Dynamic Temporal Prediction Task Go-NoGo* (DTP GNG; Mento et al., in prep.)
- *Attentional Network Test* (ANT; Rueda et al., 2004)
- *Switch Task for Children* (STC; Dibbets & Jolles, 2006)
- *The Balloon Analogue Risk Task for Children* (BART-C; Bell et al., 2019)

Queste prove indagano come, al variare del contesto predittivo, si modifichino in maniera flessibile rispettivamente: il controllo motorio, il controllo inibitorio, il controllo dell'interferenza, la flessibilità cognitiva e l'autoregolazione. Al fine di aumentare la motivazione e promuovere l'impegno dei bambini, la batteria è stata proposta sotto forma di gioco; infatti, le diverse prove sono state presentate come delle sfide che servivano ad organizzare la festa di compleanno di uno dei tre personaggi che hanno accompagnato i bambini lungo lo svolgimento dei diversi compiti. Ai fini del presente elaborato, verrà approfondito esclusivamente il compito DTP GNG (Mento et al., in prep.). Il compito sperimentale del DTP GNG (Mento et al., in prep.) rappresenta un adattamento del DTP di Mento & Granziol (2020) e permette di indagare come regole probabilistiche, che permettono di costruire modelli predittivi interni, influenzano la performance dei soggetti in termini di velocità ed accuratezza. In generale, questa batteria è estremamente innovativa in quanto permette di studiare una proprietà del controllo cognitivo ancora poco indagata in letteratura, ossia la sua natura adattiva. Inoltre, il DTP GNG (Mento et al., in prep.) si differenzia dalla versione originale del DTP (Mento & Granziol, 2020) in quanto permette di investigare in maniera specifica una componente del controllo cognitivo, ossia il controllo inibitorio, adattando le caratteristiche del secondo ad un compito di tipo Go/NoGo. Le istruzioni del compito, oltre ad essere spiegate oralmente

ai soggetti, venivano presentate anche a livello visivo tramite un'iniziale schermata introduttiva (si veda figura 6). Similmente a quelle proposte per compiti di tipo Go-NoGo (Cragg & Nation, 2008), veniva richiesto ai soggetti di premere un tasto alla comparsa di un determinato stimolo e di non premere nulla alla comparsa di un altro stimolo. Nel caso del DTP GNG (Mento et al., in prep.), viene presentato un primo stimolo (S1) di avvertimento, ossia l'obiettivo di una fotocamera, che precede la comparsa di un secondo stimolo target (S2) (figura 7). Quest'ultimo stimolo è costituito dall'apparizione, all'interno dell'obiettivo della fotocamera, di un animale (uno tra i seguenti: gatto, cane, coniglio, pappagallo, tartaruga, pecora o gufo). L'obiettivo che circonda lo stimolo S2 può essere di colore viola (*trial* Go, figura 7a) oppure giallo (*trial* No Go, figura 7b). Nel caso in cui l'obiettivo sia viola, allora è richiesto di premere il più rapidamente possibile la barra spaziatrice con l'indice della mano dominante (*trial* Go); se, invece, l'obiettivo è giallo bisogna inibire tale risposta motoria al fine di non premere alcun tasto (*trial* No Go). Allo scopo di indagare come aspettative temporali basate su regolarità locali influenzano l'accuratezza e la velocità di risposta dei soggetti, l'intervallo di tempo, definito intra-stimolo (SOA), fra la comparsa di S1 e S2 poteva presentare due differenti durate: una breve, di 400 ms, ed una lunga, di 1000 ms. Al fine di indagare, invece, come aspettative temporali basate su regolarità globali influenzano l'adattamento del controllo

	INTERVALLO BREVE (400 MS)		INTERVALLO LUNGO (1000 MS)	
	GO	NO GO	GO	NO GO
BLOCCO VELOCE	50%	20%	22.5%	7.5%
BLOCCO LENTO	22.5%	7.5%	50%	20%

Tabella 2: distribuzione di probabilità dei diversi SOA nei differenti blocchi.

cognitivo, i diversi *trial* (N totale = 160) sono stati organizzati in due tipologie di blocchi caratterizzati da differenti distribuzioni di probabilità di SOA (si veda tabella 2) lunghi o brevi. Inizialmente, viene presentato prima un blocco di tipo lento che è caratterizzato da un maggior numero di SOA lunghi (70% SOA lunghi, 30% SOA brevi), poi da un blocco di tipo veloce costituito da un maggior numero di SOA brevi (70% SOA brevi, 30% SOA lunghi). I due tipi di blocchi sono ripetuti per due volte consecutive con ordine fisso tra i soggetti, per un totale di 4 blocchi con 40 *trials* ciascuno, come rappresentato graficamente in figura 8. In questo modo, è possibile indagare l'adattamento al contesto probabilistico in due momenti differenti: in una fase precoce tra il primo e il secondo

blocco, e in una fase tardiva tra il terzo e il quarto blocco. In ciascun blocco è presente una maggior percentuale di *trial* Go rispetto a *trial* NoGo in modo tale da determinare nei soggetti una maggiore propensione all'azione. Durante la sessione sperimentale venivano effettuate diverse pause al fine di evitare un eccessivo affaticamento cognitivo; tuttavia, le pause non coincidevano mai con il passaggio da un blocco all'altro per evitare che i partecipanti potessero inferire la presenza delle differenti distribuzioni di probabilità. Il DTP GNG (Mento et al., in prep.) presenta una durata complessiva di circa 7 minuti.



Figura 6: schermata di presentazione iniziale del DTP GNG (Mento et al., in prep.).

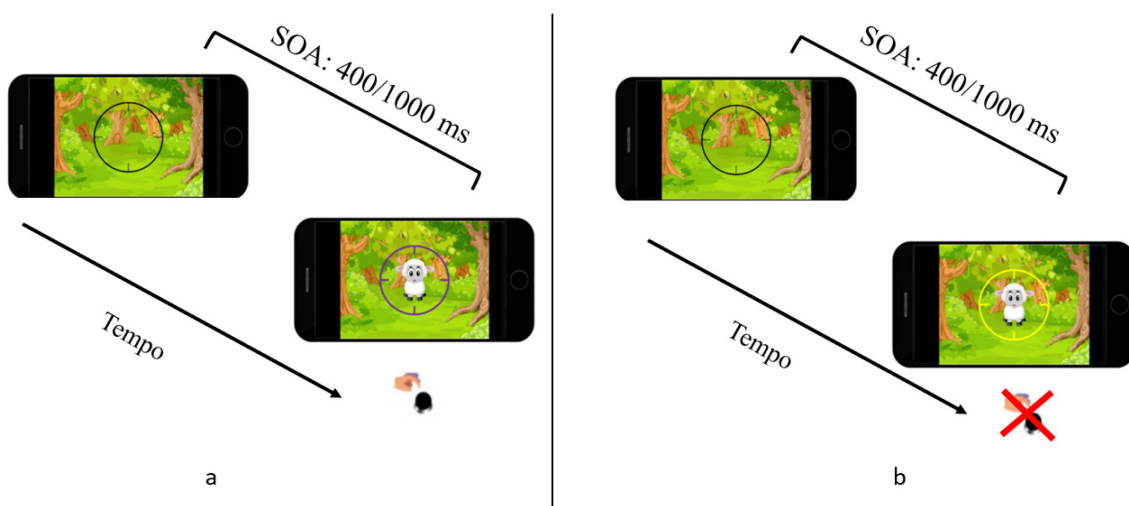


Figura 7: esempio di *trial* Go (a) e di *trial* NoGo (b).

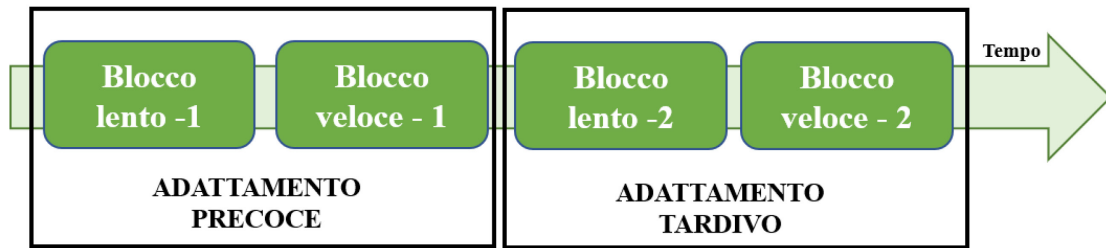


Figura 8: rappresentazione grafica del disegno sperimentale.

3.2.3.2 Questionari

Misure del controllo cognitivo esplicito sono state rilevate tramite la somministrazione della *Behavioural Rating Inventory of Executive Function, Second Edition* versione per i genitori (BRIEF-2; Marano et al., 2016) e della *Conners Parent Rating Scale - Revised* (Conners, 1997). La prima è una scala di valutazione che permette di indagare il controllo cognitivo di bambini e adolescenti in contesto ecologico. La versione per genitori di questa scala si compone di 63 item che descrivono possibili comportamenti ai quali i genitori devono rispondere indicando il grado di frequenza con cui tale comportamento viene messo in atto dal figlio tramite una scala Likert a 3 punti (mai, qualche volta, spesso). Questi item indagano 9 differenti fattori: l'inibizione, l'autocontrollo, la flessibilità, il controllo emotivo, la capacità di iniziativa, la WM, la pianificazione, l'automonitoraggio e l'organizzazione dei materiali. La *Conners Parent Rating Scale - Revised* (Conners, 1997) permette invece di indagare svariate problematiche a livello cognitivo, emotivo e comportamentale, ponendo un focus particolare sui sintomi del Disturbo da Deficit di Attenzione/Iperattività (ADHD). Questa scala è costituita da 80 item in cui viene richiesto di indicare il grado di veridicità delle diverse affermazioni tramite una scala Likert a 5 punti (da "non vero" a "molto vero"). In particolare, gli item costituiscono una serie di scale di contenuto che permettono di rilevare la presenza di svariate problematiche in bambini e adolescenti: aspetti di provocazione ed aggressività, funzionamento esecutivo disfunzionale, iperattività, ansia e timidezza, perfezionismo, problemi sociali e problemi psicosomatici. Questi questionari sono stati somministrati in maniera computerizzata tramite il software *Qualtrics Survey* (Qualtrics, 2019) ed hanno richiesto ai genitori un tempo di compilazione pari a circa 20 minuti. La somministrazione dei questionari ha coinvolto solo lo studio multidisciplinare La Fenice di Noale e la scuola Pio X di Tavo. Dal momento che la numerosità delle

risposte (N = 33, di cui N = 8 soggetti ASD) non è sufficiente per condurre delle analisi statistiche affidabili, i risultati non verranno presentati nel presente elaborato.

3.2.4 Procedura

Le sessioni sperimentali sono state condotte presso lo studio multidisciplinare “La Fenice” di Noale (Venezia) e presso l’ambulatorio per l’autismo del centro “Opera Santa Rita Onlus” (Prato) per il gruppo ASD; per il gruppo di controllo, invece, sono state svolte presso la Scuola Primaria “Pio X” di Tavo (Padova) e presso l’ambulatorio per l’autismo del centro “Opera Santa Rita Onlus” (Prato). Prima di cominciare le sessioni sperimentali, ai genitori dei soggetti è stato chiesto di firmare il consenso informato alla partecipazione ed al trattamento dei dati. I soggetti sono stati condotti in una stanza ben illuminata e silenziosa, si sono seduti ad una distanza di circa 60 cm dallo schermo del computer portatile ed hanno completato una serie di prove della batteria PACC (Mento & Tarantino, in prep), fra cui il DTP GNG (Mento et al., in prep.). I diversi stimoli della batteria, caratterizzati da una risoluzione pari a 1024 x 768 pixels, sono stati presentati tramite un computer portatile ASUS con schermo di 15,6 pollici. Tutte le singole prove sono state spiegate ai soggetti poco prima del loro svolgimento e le istruzioni del compito sono state presentate anche a livello visivo; inoltre, prima dell’inizio della sessione sperimentale vera e propria, i soggetti hanno svolto una prima fase di pratica (N totale = 10) al fine di familiarizzare con il compito. Durante questa fase, i soggetti hanno ricevuto dei *feedback* visivi rispetto all’accuratezza ed alla velocità della loro performance. In particolare:

- uno smile giallo sorridente con il pollice alzato è apparso quando i soggetti hanno dato una risposta corretta e veloce (tempi di reazione tra i 150 ms ed i 1000 ms dalla comparsa di S2);
- uno smile giallo che sbadiglia è apparso quando i soggetti hanno dato risposte eccessivamente lente (> 1500ms);
- uno smile giallo imbarazzato è apparso quando i soggetti hanno dato risposte sbagliate (ad esempio, premono il tasto nei *trial* NoGo) o premature (tempi di reazione inferiori a 150 ms dalla comparsa di S2).

Al fine di evitare un eccessivo affaticamento, durante la sessione sperimentale sono state fornite diverse pause ai soggetti. In totale l’esperimento è caratterizzato da una durata di circa 45 minuti. In un secondo momento, ai genitori dei partecipanti è stato inviato un questionario digitalizzato, creato con *Qualtrics Surveys* (Qualtrics, 2019), contenente la scala *Conners Parent Rating Scale - Revised* (Conners, 1997) e la scala BRIEF-2.

3.2 IPOTESI SPERIMENTALI

Sono state formulate tre differenti ipotesi sperimentali:

- 1) H1: per quanto concerne il contesto predittivo di tipo locale (SOA breve e lungo), sulla base di studi precedenti (Los, 2010; Johnson, Burrowes & Coull, 2015; Mento & Tarantino, 2015; Girardi et al., 2021), ci si attende che sia i soggetti appartenenti al gruppo di controllo che quelli del gruppo ASD presentino tempi di reazione inferiori nei *trial* caratterizzati da SOA lunghi (1000 ms) rispetto ai *trial* caratterizzati da SOA brevi (400 ms). Questo effetto, noto come *foreperiod effect* (Niemi & Näätänen, 1981), riguarda un vantaggio nei tempi di risposta quando l'intervallo di preparazione all'interno dei *trial* è lungo rispetto a quando è corto. Infatti, il passaggio unidirezionale del tempo crea implicitamente un bias circa la prossima comparsa del target: all'aumentare del tempo aumenta la probabilità percepita di comparsa dello stesso e, di conseguenza, la preparazione alla risposta.
- 2) H2: per quanto concerne il contesto predittivo di tipo globale (blocchi *fast* e *slow*) si ipotizza, coerentemente con i risultati ottenuti da Droit-Volet & Coull (2016) e da Mento & Granzio (2020), che il gruppo di controllo, al variare delle caratteristiche del contesto probabilistico, mostri un adattamento del controllo motorio: in particolare, i soggetti dovrebbero presentare una modulazione dei tempi di reazione in funzione dei blocchi, con tempi di reazione minori nei blocchi veloci (caratterizzati da SOA brevi maggiormente frequenti) e tempi di reazione maggiori nei blocchi lenti (caratterizzati da SOA lunghi maggiormente frequenti). Per quanto riguarda il gruppo ASD, al contrario, non si ipotizza l'occorrenza di una modulazione dei tempi di risposta in base alla tipologia di blocco; infatti, coerentemente con la teoria di van der Cruys et al. (2014), persone autistiche dovrebbero presentare delle difficoltà nell'adattarsi a variazioni ambientali (H2a). Al fine di indagare in maniera specifica come l'adattamento della performance ai diversi blocchi si modifica nel corso del tempo, sono stati calcolati due indici, Delta 1 e Delta 2, che riflettono rispettivamente la presenza di un adattamento precoce e tardivo. Per quanto riguarda il gruppo TD, sulla base di risultati preliminari (Del Popolo Cristaldi et al., in prep), ci si attende un effetto dell'età. Nello specifico, ci si attende un adattamento tardivo in tutte le fasce d'età, mentre un adattamento precoce solo nei preadolescenti e adolescenti. Per quanto concerne il gruppo ASD, a causa della mancanza di studi condotti nell'ambito,

non siamo in grado di definire un'ipotesi precisa, per questo motivo ci si è limitati ad indagare a livello esplorativo la performance dei soggetti (H2b).

- 3) H3: in generale, coerentemente con studi comportamentali (Pennington & Ozonoff, 1996; Solomon et al., 2008) che individuano una compromissione a carico del controllo cognitivo nell'ASD, si ipotizza che globalmente i soggetti appartenenti al gruppo ASD presentino, rispetto ai soggetti del gruppo di controllo, maggiori difficoltà (accuratezza inferiore) nella capacità di inibire la propria risposta motoria nei *trial* di tipo NoGo (H3a). Inoltre, ci si attende un'influenza del contesto predittivo globale sul controllo inibitorio solo nel gruppo di controllo. Nello specifico, per quanto riguarda il gruppo di controllo si ipotizza che nei blocchi lenti, rispetto ai blocchi veloci, essi presentino una maggiore abilità di inibizione (accuratezza maggiore) nei *trial* NoGo grazie alla minore propensione all'azione (maggiore frequenza di SOA lunghi); non ci si attende la presenza di questo fenomeno nel gruppo ASD a causa della difficoltà nel modulare la propria performance motoria in funzione dei diversi contesti probabilistici (van der Cruys et al., 2013) (H3b).

3.3 ANALISI DEI DATI

La presente ricerca ha impiegato un disegno sperimentale misto: 2 (gruppo) x 2 (SOA) x 2 (tipo di *trial*) x 4 (blocco). Le variabili indipendenti analizzate comprendevano i seguenti livelli:

- gruppo: TD vs ASD; sono state confrontate le performance ottenute dai soggetti appartenenti ai diversi gruppi al fine di valutare la presenza di una differenza in termini di velocità e accuratezza nelle risposte;
- SOA: intervallo breve (400 ms) vs intervallo lungo (1000 ms); questo confronto ha permesso di valutare la presenza del *foreperiod effect* (Niemi & Näätänen, 1981) indotto dalla predicibilità locale, secondo cui vengono date risposte più veloci a SOA lunghi;
- tipo di *trial*: Go vs. NoGo; tale confronto ha permesso di investigare la capacità di inibizione motoria al variare del contesto predittivo lungo il compito;
- blocco: Block 1 vs Block 2 vs Block 3 vs Block 4; è stata confrontata la performance dei soggetti nei diversi blocchi al fine di valutare l'adattamento implicito di tipo precoce e tardivo a variazioni probabilistiche del contesto;
- cluster: bambini vs preadolescenti vs adolescenti; questo confronto ha permesso di valutare se l'età influenza in maniera significativa la performance dei soggetti.

Sono state analizzate le seguenti variabili dipendenti:

- l'accuratezza che è stata considerata come variabile dicotomica a due modalità (1 = corretto; 0 = non corretto);
- l'*Inverse Efficiency Score* (IES) che è un indice che permette di valutare la velocità di risposta pesata per l'accuratezza (*speed-accuracy trade off*); tale indice permette di investigare in maniera più accurata la velocità di risposta dei soggetti in quanto non viene eccessivamente influenzato da risposte estremamente veloci che, però, non sono corrette. Infatti, nel DTP GNG (Mento et al., in prep.) è importante non solo essere rapidi nel reagire agli stimoli, ma anche rispondere in maniera corretta. La formula per calcolare questo indice è:

$$\frac{RT}{1 - PE}$$

- *Delta 1*, che corrisponde alla differenza fra i tempi di reazione delle risposte corrette del primo blocco e del secondo blocco (RT Block 2 - RT Block 1). Un punteggio negativo di questo indice, che viene ottenuto quando la performance dei soggetti al secondo blocco è migliore (RT minori) rispetto al primo, riflette un adattamento della performance motoria dei soggetti alle variazioni globali del contesto. Tale adattamento è definito precoce in quanto Delta 1 è calcolato nella prima metà del compito (primi due blocchi);
- *Delta 2*, che corrisponde alla differenza fra i tempi di reazione delle risposte corrette del terzo blocco e del quarto blocco (RT Block 4 - RT Block 3); similmente a Delta 1, valori negativi di questo indice riflettono un adattamento, in questo caso definito tardivo in quanto calcolato nella seconda metà del compito (ultimi due blocchi), della performance motoria a variazioni implicite del contesto.

L'ipotesi H1 è stata valutata tramite l'utilizzo di modelli lineari misti (LMMs) con intercetta random per il soggetto. È stata inserita come variabile dipendente l'IES trasformato logaritmicamente al fine di normalizzarne la distribuzione. Per individuare il modello che spiegasse la maggior varianza dei dati sono stati confrontati, tramite l'*Akaiake Information Criterion* (AIC), una serie di modelli lineari misti caratterizzati dalle diverse combinazioni possibili delle seguenti variabili indipendenti: gruppo, SOA, tipo di *trial* e blocco. Il modello più adeguato, individuato sulla base dell'indice AIC più basso, è risultato essere il modello con variabili indipendenti gruppo e SOA. Per quanto riguarda le ipotesi H2a, H2b, H3a ed H3b, in linea con un recente studio (Del Popolo Cristaldi et al., in prep.), abbiamo preso in considerazione nelle analisi statistiche

esclusivamente i *trial* caratterizzati da SOA brevi (400 ms), in cui gli effetti di modulazione della risposta motoria risultano enfatizzati. L'ipotesi H2a è stata indagata confrontando una serie di modelli lineari (LMMs) caratterizzati dalla variabile dipendente IES e dalle variabili indipendenti: gruppo, blocco e cluster. Il modello migliore secondo l'AIC è risultato essere quello con gruppo e blocco come predittori. Per quanto riguarda l'ipotesi H2b, è stato necessario valutare separatamente la presenza di un adattamento precoce (Delta 1 come variabile dipendente) e di un adattamento tardivo (Delta 2 come variabile dipendente). In entrambi i casi, il modello più adeguato secondo l'AIC è risultato essere quello caratterizzato dalle variabili indipendenti gruppo e cluster. L'ipotesi H3, infine, è stata valutata tramite l'utilizzo di modelli lineari generalizzati misti (GLMMs) con intercetta random per il soggetto, caratterizzati dalla variabile dipendente accuratezza. Sono stati confrontati diversi modelli con le seguenti variabili indipendenti: gruppo, SOA, tipo di *trial* e cluster. Il modello più adeguato in base all'AIC è risultato essere quello caratterizzato da gruppo, tipo di *trial* e blocco come predittori.

4. RISULTATI

4.1 H1: ADATTAMENTO AL CONTESTO PREDITTIVO LOCALE

I risultati ottenuti hanno rilevato la presenza di un effetto principale del SOA ($F_{(1, 1768.03)} = 8.80, p = .003$) e dell'interazione gruppo x SOA ($F_{(1, 1768.03)} = 4.08, p = .044$), come è possibile osservare in figura 9. Analizzando i confronti appaiati fra i SOA all'interno dei due gruppi è emersa una differenza significativa fra il SOA breve e lungo solo nel gruppo TD ($t_{(1766)} = 3.95, p < .001$) ma non nel gruppo ASD ($t_{(1769)} = .61, p = .542$). Questi dati confermano solo parzialmente l'ipotesi H1 in quanto la presenza del *foreperiod effect* (Niemi & Näätänen, 1981) sembra essere presente esclusivamente nel gruppo TD. I soggetti appartenenti a tale gruppo, infatti, presentano IES inferiori in *trial* caratterizzati da SOA lunghi; al contrario, nei soggetti appartenenti al gruppo ASD non è stata rilevata alcuna differenza significativa fra i *trial* caratterizzati da SOA brevi e quelli caratterizzati da SOA lunghi, come è possibile osservare in figura 10.

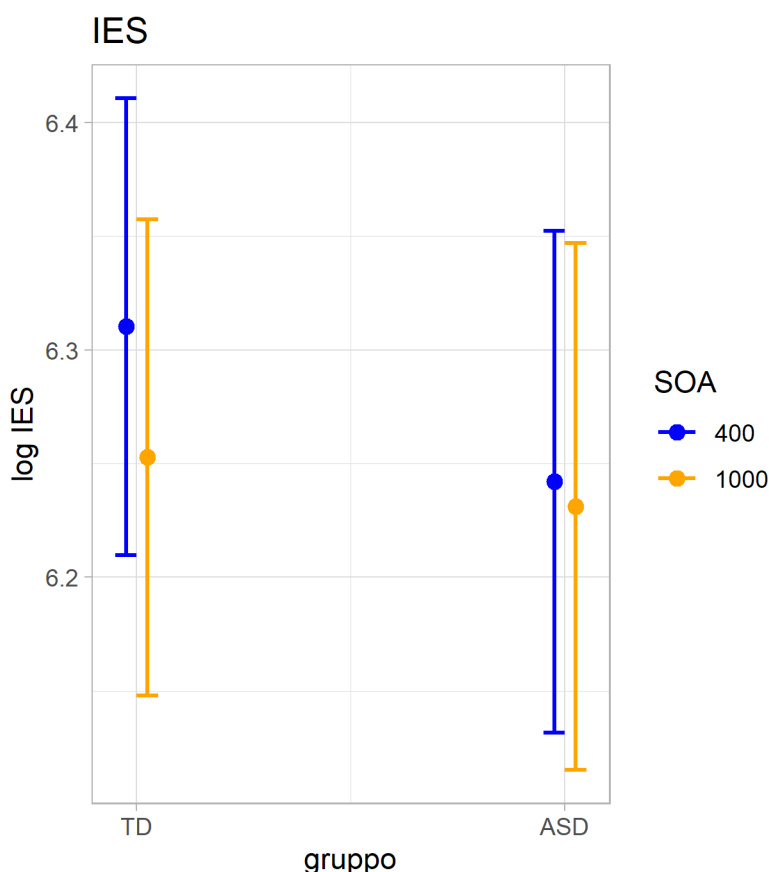


Figura 9: grafico del modello lineare misto con variabile dipendente IES trasformato logaritmicamente e variabile indipendente gruppo (TD, ASD) e SOA (400 ms, 1000 ms).

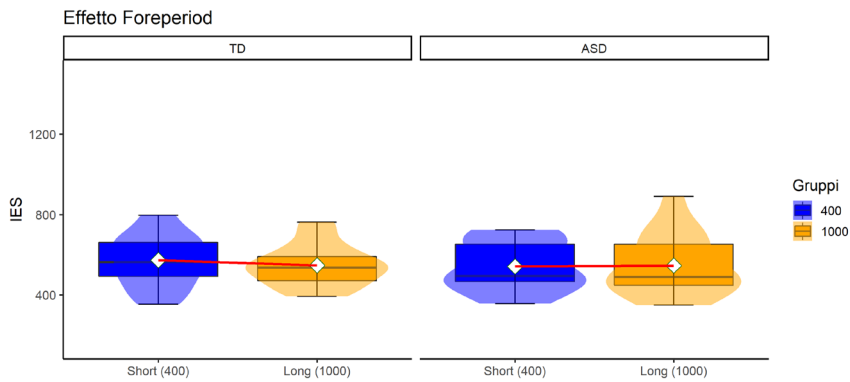


Figura 10: grafico che rappresenta la distribuzione dell'IES in funzione del gruppo (TD, ASD) e del SOA (400ms, 1000ms).

4.2 H2A: ADATTAMENTO AL CONTESTO PREDITTIVO GLOBALE

I risultati non hanno evidenziato alcun effetto del gruppo ($F_{(1, 31.39)} = .50, p = .483$), del blocco ($F_{(3, 851.54)} = .92, p = .428$) o dell'interazione gruppo x blocco ($F_{(3, 851.54)} = .37, p = .776$). Questo non supporta l'ipotesi H2a in quanto non emerge una modulazione della prestazione al variare del contesto predittivo globale; tuttavia, ciò potrebbe suggerire una gestione strategica del contesto al fine di ottimizzare il controllo inibitorio lungo il compito. Osservando la figura 11, nel gruppo ASD è possibile individuare a livello qualitativo la presenza di una maggiore variabilità dell'IES tra i diversi blocchi; infatti, l'IES dei soggetti sembra aumentare lungo il compito, in particolare tra il secondo e il quarto blocco. In questo caso l'ipotesi H2a trova solo parziale conferma; infatti, i risultati suggeriscono la presenza di un lieve adattamento tra il primo e il secondo blocco (diminuzione dell'IES) ma nessun adattamento nella seconda metà del compito dove si osserva un rallentamento della prestazione. Questo fenomeno potrebbe dipendere dallo sforzo cognitivo determinato dal prolungato impegno richiesto dal compito e suggerisce che gli ASD, al contrario dei TD, non siano riusciti ad ottimizzare le risorse cognitive in base alle caratteristiche del contesto.

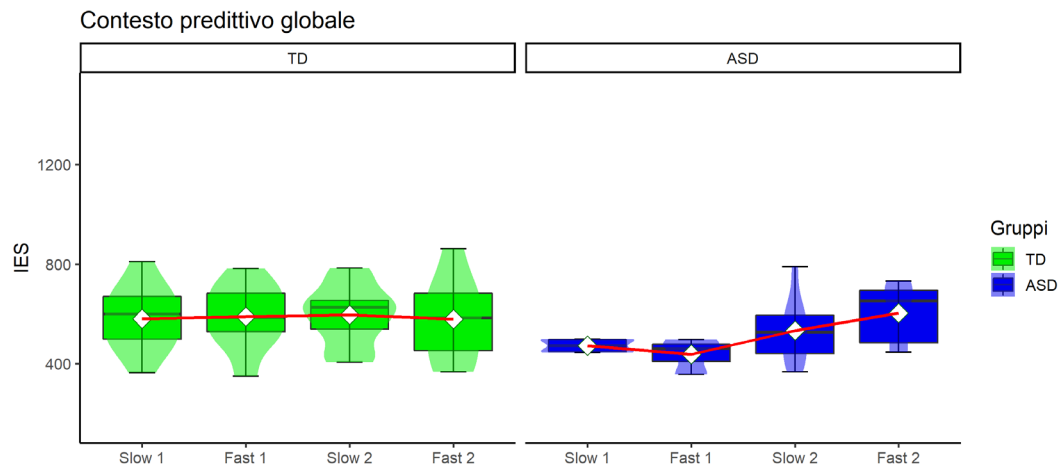


Figura 11: grafico che rappresenta la distribuzione dell'IES in funzione del gruppo (TD, ASD) e del blocco (1,2,3,4).

4.3 H2B: ANDAMENTO EVOLUTIVO DELL'ADATTAMENTO AL CONTESTO PREDITTIVO GLOBALE

I risultati ottenuti dalle analisi relative al Delta 1 hanno rilevato la presenza di un effetto significativo di interazione gruppo x cluster ($F_{(2)} = 55.40, p < .001$) (si veda figura 12). Analizzando i confronti appaiati fra i gruppi all'interno di ciascun cluster, è emersa una differenza significativa fra i gruppi sia nel cluster dei bambini ($t_{(859)} = -2.02, p = .044$), sia nel cluster dei preadolescenti ($t_{(859)} = -7.74, p < .001$) sia nel cluster degli adolescenti ($t_{(859)} = 6.97, p < .001$). Analizzando i confronti appaiati fra i cluster all'interno di ciascun gruppo, è emersa una differenza significativa tra i bambini e gli adolescenti ($t_{(859)} = -3.01, p = .008$) e tra i preadolescenti e gli adolescenti ($t_{(859)} = -5.12, p < .001$) nel gruppo TD, e una differenza significativa tra bambini e preadolescenti ($t_{(859)} = -2.85, p = .013$), bambini e adolescenti ($t_{(859)} = 4.80, p < .001$) e preadolescenti e adolescenti ($t_{(859)} = 9.23, p < .001$) nel gruppo ASD. I risultati ottenuti confermano solo parzialmente le ipotesi effettuate riguardo ai soggetti appartenenti al gruppo TD. Come atteso, infatti, si osserva un effetto evolutivo con un miglioramento passando dai bambini ai preadolescenti, che sembrano gli unici in grado di adattarsi in maniera precoce alle variazioni probabilistiche del contesto. Invece, nessun adattamento si osserva negli adolescenti, che mostrano inoltre una prestazione peggiore rispetto agli altri cluster. Queste evidenze non confermano completamente l'ipotesi H2b; infatti, sulla base di studi preliminari (Dal Popolo Cristaldi, in prep.), era stata ipotizzata la presenza di apprendimento precoce maggiore negli adolescenti rispetto agli altri cluster d'età. I risultati relativi a Delta 2 rilevano un effetto significativo del gruppo ($F_{(1)} = 90.25, p < .001$), del cluster ($F_{(2)} = 43.67, p < .001$) e dell'interazione gruppo x cluster ($F_{(2)} = 7.02,$

$p < .001$): si veda figura 13. Analizzando i confronti appaiati fra i gruppi all'interno di ciascun cluster, è emersa una differenza significativa fra i gruppi sia nel cluster dei preadolescenti ($t_{(859)} = 3.94, p < .001$) sia nel cluster degli adolescenti ($t_{(859)} = 7.94, p < .001$). Analizzando i confronti appaiati fra i cluster all'interno di ciascun gruppo, è emersa una differenza significativa tra i bambini e gli adolescenti ($t_{(859)} = -5.66, p < .001$), tra i bambini e i preadolescenti ($t_{(859)} = -7.96, p < .001$) e tra i preadolescenti e gli adolescenti ($t_{(859)} = 2.51, p = .033$) nel gruppo TD, e una differenza significativa tra i bambini e i preadolescenti ($t_{(859)} = -4.96, p < .001$) e tra i preadolescenti e gli adolescenti ($t_{(859)} = 5.54, p < .001$) nel gruppo ASD. I risultati ottenuti supportano solo parzialmente H2b in quanto nel gruppo TD i preadolescenti non mostrano l'apprendimento atteso. Nel gruppo ASD, invece, si osserva un apprendimento in tutti i cluster, anche se inferiore nei preadolescenti. Tali evidenze non sono coerenti con l'ipotesi H2b secondo cui tutti i soggetti del gruppo TD dovrebbero presentare un adattamento tardivo indipendentemente dal cluster. È interessante notare che, come osservabile in figura 14, gli unici soggetti a presentare un adattamento tardivo al compito sembrano essere quelli appartenenti al gruppo ASD che presentano un Delta 2 negativo. Complessivamente, sono emerse differenze e similitudini nell'andamento evolutivo della capacità di adattamento precoce (Delta 1) e tardivo (Delta 2) fra i soggetti appartenenti al gruppo TD e quelli appartenenti al gruppo ASD (si veda figura 15). In particolare, in entrambi i gruppi bambini e adolescenti si adattano tardivamente in misura maggiore rispetto ai preadolescenti. Questo tipo di pattern sembra caratterizzare anche i risultati ottenuti, rispetto all'apprendimento precoce, dai soggetti appartenenti al gruppo ASD; mentre, in TD sembra presentarsi un pattern opposto caratterizzato da un miglior adattamento precoce dei preadolescenti rispetto ai bambini ed agli adolescenti. Questi risultati verranno approfonditi e discussi nel prossimo capitolo.

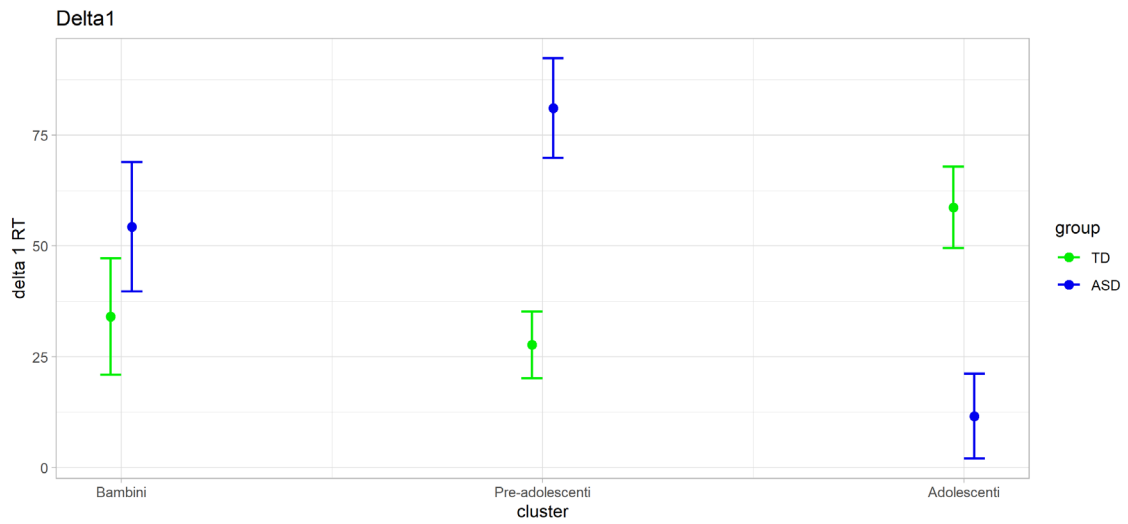


Figura 12: grafico del modello lineare misto con variabile dipendente Delta 1 e variabile indipendente gruppo (TD, ASD) e cluster (bambini, preadolescenti, adolescenti).

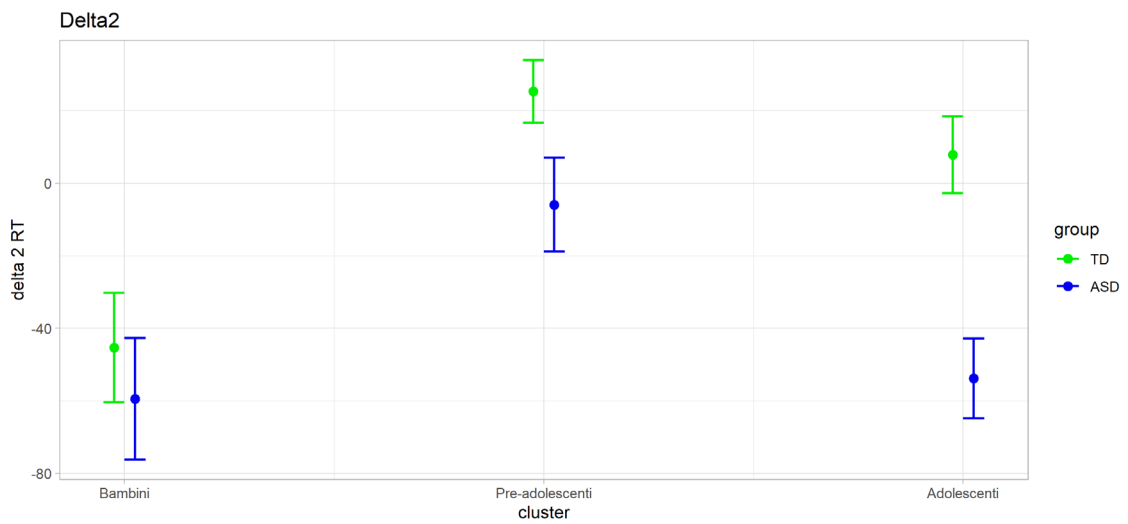


Figura 13: grafico del modello lineare misto con variabile dipendente Delta 2 e variabile indipendente gruppo (TD, ASD) e cluster (bambini, preadolescenti, adolescenti).

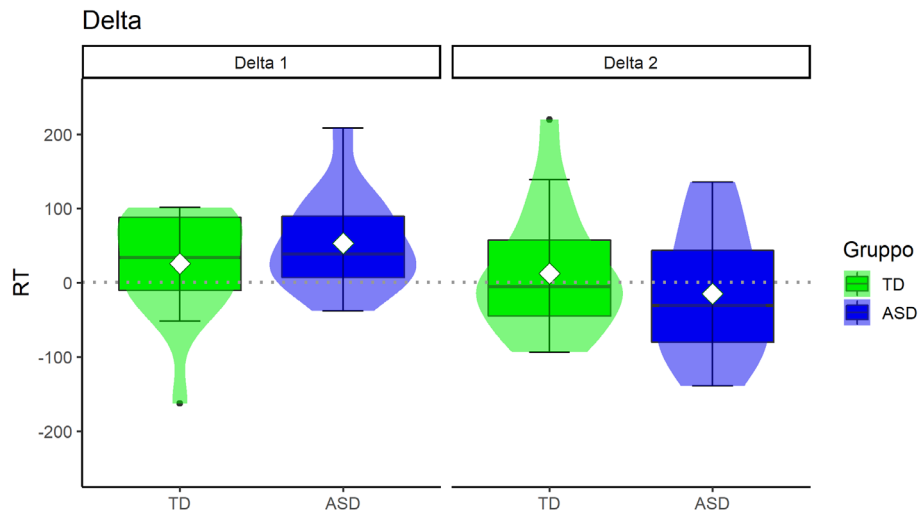


Figura 14: grafico che rappresenta la distribuzione degli RT in funzione del gruppo (TD, ASD) e del Delta (1,2).

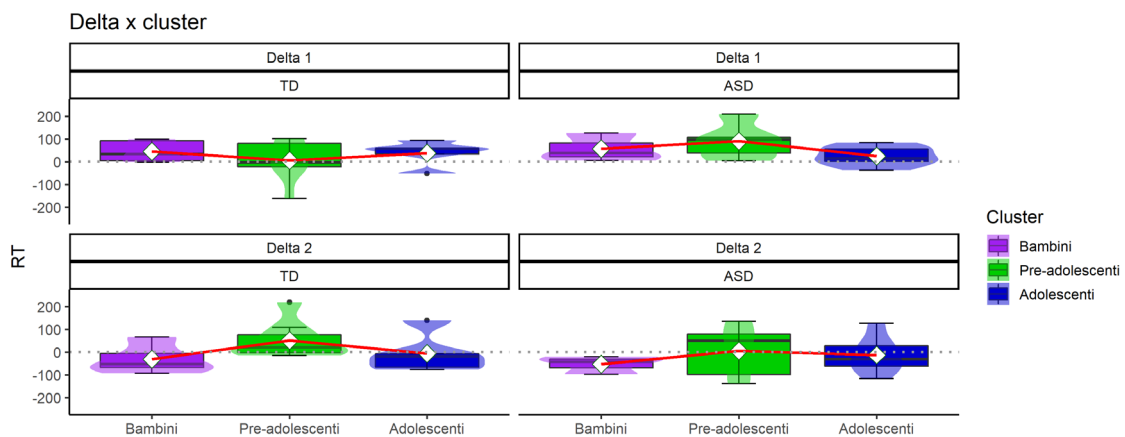


Figura 15: grafico che rappresenta la distribuzione degli RT in funzione del gruppo (TD, ASD), del cluster (bambini, preadolescenti, adolescenti) e del Delta (1,2).

4.4 H3A E H3B: IL CONTROLLO INIBITORIO

I risultati ottenuti suggeriscono che l'accuratezza della performance dei soggetti è influenzata significativamente dal gruppo ($\chi^2_{(1)} = 9.00, p = .003$), dal tipo di *trial* ($\chi^2_{(1)} = 285.74, p < .001$) e dall'interazione *trial* x blocco ($\chi^2_{(3)} = 21.15, p < .001$), come visibile in figura 16. Analizzando i confronti appaiati dei *trial* all'interno di ciascun blocco, è emersa una differenza significativa tra i due *trial* in tutti i blocchi (blocco 1: $z_{(inf)} = 7.65, p < .001$; blocco 2: $z_{(inf)} = 8.65, p < .001$; blocco 3: $z_{(inf)} = 7.34, p < .001$; blocco 4: $z_{(inf)} = 7.10, p < .001$). Analizzando i confronti appaiati dei blocchi all'interno di ciascun *trial* è

emersa una differenza significativa tra il blocco 1 e il blocco 4 ($z_{(inf)} = 3.36, p = .004$) e tra il blocco 2 e il blocco 4 ($z_{(inf)} = 3.23, p = .007$) per la condizione Go, nessuna differenza significativa tra i blocchi nella condizione No Go. Questi risultati confermano solo in parte l'ipotesi H3a; infatti, il gruppo ASD, indipendentemente dal tipo di *trial* (Go, NoGo) considerato, presenta una minore accuratezza rispetto al gruppo TD, come è possibile osservare in figura 17. L'ipotesi H3b, invece, non è confermata dai risultati ottenuti in quanto non è stato rilevato alcun effetto significativo dell'interazione gruppo x blocco ($\chi^2_{(3)} = 3.03, p = .387$). A partire dall'esplorazione grafica dei risultati ottenuti (si veda figura 18) è possibile notare a livello qualitativo che in TD non è presente alcuna modulazione della risposta inibitoria in funzione del blocco nei *trial* Go, dove mantengono un livello di accuratezza a soffitto, mentre sembra essere presente nei *trial* No Go. I soggetti ASD, invece, non mostrano modulazione nei *trial* Go ma un effetto di affaticamento lungo il compito (la prestazione diminuisce gradualmente); nei *trial* No Go, mostrano una modulazione dei blocchi in controtendenza rispetto a quella osservata nei TD: sbagliano di più nei blocchi *fast* e meno in quelli *slow*, al contrario dei TD. Tali evidenze sono discordanti con quanto ipotizzato (H3b).

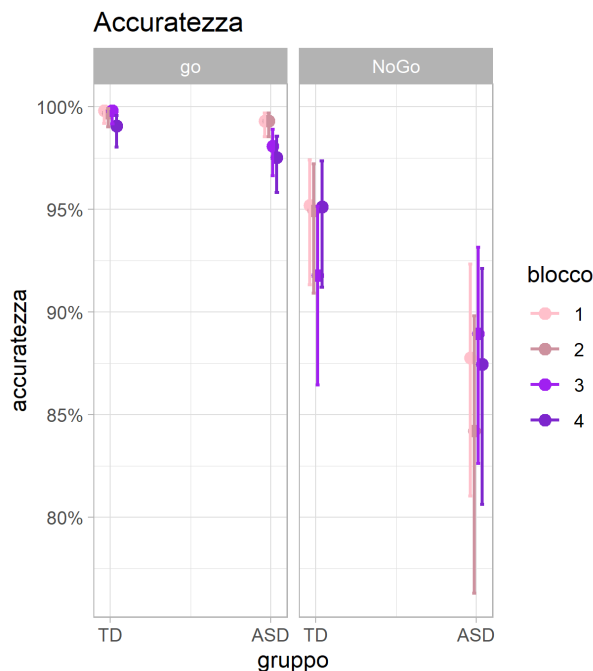


Figura 16: grafico del modello lineare con variabile dipendente accuratezza e variabile indipendente gruppo (TD, ASD) e blocco (1,2,3,4).

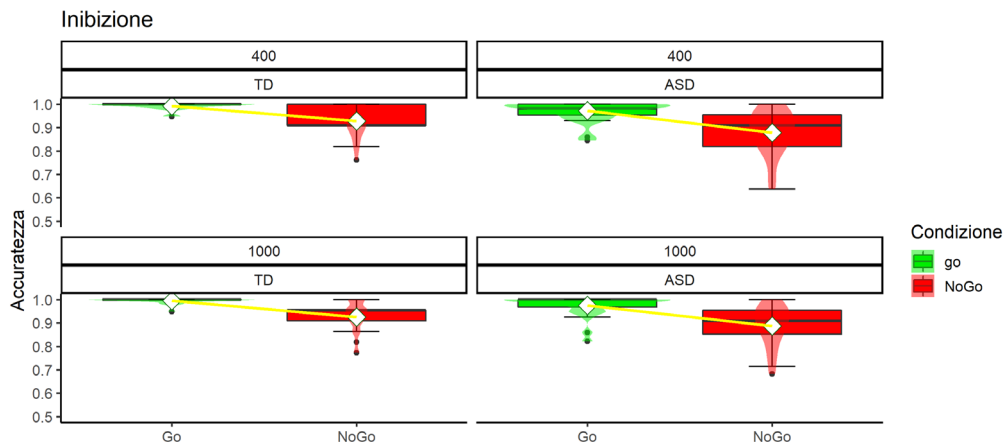


Figura 17: grafico che rappresenta la distribuzione dell'accuratezza in funzione del SOA (400 ms, 1000 ms), del gruppo (TD, ASD) e del tipo di *trial* (Go, NoGo).

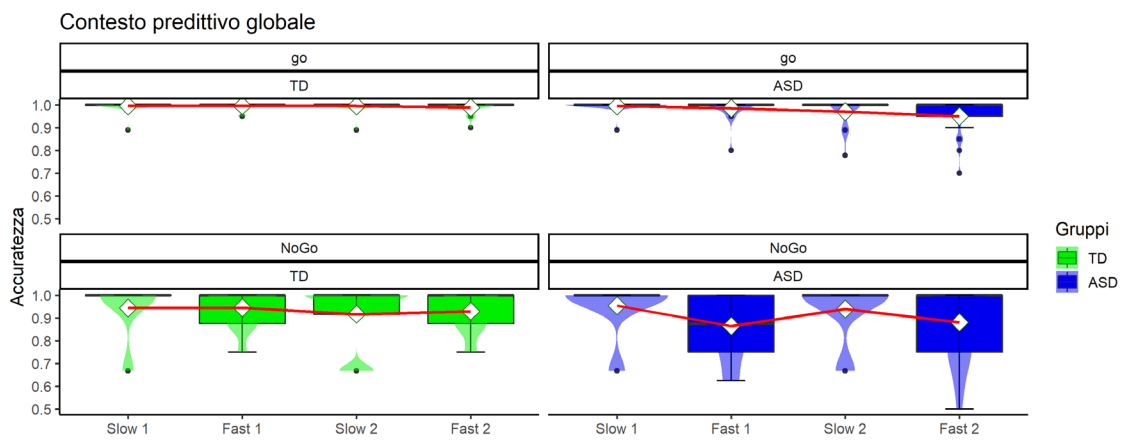


Figura 18: grafico che rappresenta la distribuzione dell'accuratezza in funzione del gruppo (TD, ASD), del tipo di *trial* (Go, NoGo) e del blocco (1,2,3,4).

5. DISCUSSIONE

Il presente studio si colloca in un progetto di ricerca più ampio denominato “*Attenzione e concentrazione: traiettorie evolutive e differenze individuali*” che si propone di investigare come il controllo cognitivo adattivo si modifica nel corso dello sviluppo tipico e atipico. In questo specifico elaborato ci si è limitati ad indagare come il controllo inibitorio, specifica componente del controllo cognitivo, si modifichi sulla base di aspettative temporali indotte a livello locale e globale in soggetti con diagnosi di Disturbo dello Spettro dell’Autismo (ASD). Al fine di raggiungere tale scopo è stato somministrato un compito sperimentale, il DTP GNG (Mento et al., in prep), a soggetti di età compresa fra i 6 ed i 15 anni, suddivisi in due gruppi: soggetti a sviluppo tipico (TD) e soggetti con diagnosi di Disturbo dello Spettro dell’Autismo (ASD). Il DTP GNG (Mento et al., in prep.) è un compito di tipo Go/NoGo (Cragg & Nation, 2008) in cui è stata adottata una manipolazione *list-wide* della proporzione dei *trial* caratterizzati da SOA brevi (400 ms) e da SOA lunghi (1000 ms) che va a definire la presenza di due tipologie di blocchi (lento vs veloce) che si alternano con una sequenza fissa lungo il compito (lento-veloce-lento-veloce). La presenza di blocchi caratterizzati da regolarità temporali differenti dovrebbe condurre i partecipanti, coerentemente con quanto ipotizzato dal modello teorico del *Predictive Coding* di Clarks (2013), alla creazione di modelli predittivi interni che al variare del contesto probabilistico, e quindi del blocco, vengono aggiornati al fine di favorire l’adattamento del controllo inibitorio al contesto. La presenza di SOA differenti (400 e 1000 ms), inoltre, ha permesso di investigare l’influenza delle aspettative temporali indotte a livello locale. In questo capitolo discuteremo i risultati ottenuti cercando di trarre delle conclusioni coerenti con il quadro teorico presentato nei primi capitoli, definendo i limiti, le implicazioni cliniche e le prospettive di ricerca future che caratterizzano questo progetto di ricerca.

5.1 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

5.1.1 Adattamento al contesto predittivo locale

Al fine di investigare la capacità di adattamento del controllo cognitivo ad aspettative temporali locali è stata manipolata la durata del SOA: breve (400 ms) o lungo (1000 ms). Questo fenomeno, noto come *foreperiod effect* (Niemi & Näätänen, 1981), si riflette in tempi di reazione (RTs) minori in presenza di SOA lunghi e sarebbe dovuto ad un bias nella probabilità percepita di occorrenza dello stimolo, che aumenta con il passare del tempo. È stato ipotizzato che questo fenomeno fosse presente in entrambi i gruppi, in

linea con studi precedenti (Mento et al., 2020; Duma et al., 2021; Girardi et al., 2021). I risultati ottenuti confermano solo parzialmente tale ipotesi; infatti, solo nel gruppo TD è emerso il *foreperiod effect* (Niemi & Näätänen, 1981). Queste evidenze, congiuntamente a quelle di Girardi et al. (2021), consentono di ipotizzare che nell'ASD la capacità di adattare in maniera flessibile il controllo cognitivo ad aspettative temporali locali emerge solo durante l'adolescenza o la prima età adulta (Niemi & Näätänen, 1981). Tale ipotesi necessita di essere confermata da ulteriori studi che reclutino campioni caratterizzati da un range di età superiore rispetto a quello utilizzato in questa ricerca al fine di investigare la traiettoria evolutiva dell'abilità di predizione temporale locale nell'ASD. Tali evidenze sono coerenti con l'idea, supportata dai modelli neuropsicologici predittivi dell'ASD (Pellicano & Burr, 2012; Sinha et al., 2014; Lawson, Rees & Friston, 2014; van der Cruys et al., 2014), secondo cui persone autistiche presentino una serie di difficoltà nel costruire ed utilizzare aspettative temporali. Tuttavia, occorre prendere in considerazione l'ipotesi che l'assenza di effetto *foreperiod* (Niemi & Näätänen, 1981) nel gruppo ASD possa dipendere dalla natura specifica del compito che, a differenza dei compiti classici precedentemente utilizzati in letteratura, prevede una discriminazione tra item di tipo Go e di tipo NoGo. È infatti presumibile che la necessità di condizionare la risposta al tipo di *trial* possa aver influito sulla tradizione locale diluendone l'effetto. Aldilà della spiegazione più valida rimane interessante notare la presenza di un effetto del gruppo che tuttavia andrebbe approfondito con ulteriori studi.

5.1.2 Adattamento al contesto predittivo globale

Per quanto riguarda l'adattamento del controllo cognitivo ad aspettative temporali globali, è stata ipotizzata nel gruppo TD la presenza di una modulazione della velocità di risposta al variare dei blocchi. Nello specifico, ci si attendono valori inferiori dell'*Inverse Efficiency Score (IES)*, ovvero un indice di velocità pesato per l'accuratezza, nei blocchi veloci rispetto ai blocchi lenti, come esito della capacità umana di generare modelli predittivi della realtà a partire da regolarità temporali per adattare conseguentemente il controllo cognitivo. Questa ipotesi non è stata confermata dalle evidenze ottenute in quanto i soggetti TD, in contrasto con risultati precedenti (Del Popolo Cristaldi, *under review*), hanno mantenuto IES sostanzialmente stabili tra i blocchi. Una potenziale spiegazione può essere legata alla presenza di richiesta inibitoria lungo il compito. Infatti, è possibile che al fine di ottimizzare la gestione del controllo inibitorio, i soggetti abbiano implementato una gestione strategica del contesto, riducendo pertanto la tendenza

proattiva a rispondere velocemente nei blocchi veloci al fine di controllare gli errori di commissione. Infatti, nel passaggio da un blocco lento ad un blocco veloce, la normale propensione ad accelerare i tempi di risposta potrebbe in realtà essere controproducente e comportare una minore accuratezza negli item di tipo NoGo. Per quanto riguarda il gruppo ASD, è stata ipotizzata la mancanza di una modulazione dell'IES al variare dei blocchi. I risultati ottenuti mostrano la presenza di un'iniziale modulazione (diminuzione dei tempi di risposta dal blocco lento al blocco veloce) a cui tuttavia segue un progressivo aumento lungo la seconda metà del compito (dal secondo al quarto blocco): queste evidenze supportano sia la presenza di una difficoltà da parte del gruppo ASD nell'adattare il comportamento motorio alle richieste ambientali, sia la presenza di un affaticamento lungo il compito che riflette un'incapacità nel gestire le risorse cognitive in maniera strategica in funzione del contesto. Questi risultati nel complesso suggeriscono che nel DTP GNG (Mento et al., in prep.) l'adattamento al contesto globale occorra come bilanciamento efficiente del controllo inibitorio (accuratezza ai *trial* NoGo) in funzione dei diversi contesti predittivi (aumento dei tempi di reazione in blocchi veloci al fine di mantenere livelli adeguati di accuratezza). Questa visione permette di spiegare i risultati ottenuti dai partecipanti relativamente all'indice Delta 1 (indice di adattamento precoce) e Delta 2 (indice di adattamento tardivo). Relativamente a tali indici di adattamento, infatti, è stato notato che a livello precoce (Delta 1) nessun gruppo presenta un adattamento. I bambini e i preadolescenti TD, tuttavia, presentano un adattamento precoce migliore (punteggi Delta 1 più negativi) rispetto al gruppo ASD; mentre negli adolescenti si riscontra una tendenza opposta: il gruppo ASD si adatta meglio in confronto al gruppo TD. I risultati ottenuti non sono in linea con studi preliminari effettuati sul DTP-2 (Dal Popolo Cristaldi, *under review*), che suggeriscono la presenza di apprendimento precoce a partire dall'adolescenza. Tale discrepanza può essere spiegata sulla base del bilanciamento fra controllo inibitorio e adattamento della velocità di risposta al contesto predittivo che viene richiesto dal DTP GNG (Mento et al., in prep.): i soggetti TD tendono a ridurre la spinta proattiva a rispondere velocemente nei blocchi veloci al fine di mantenere un adeguato livello di accuratezza nei *trial* NoGo. Per quanto riguarda l'indice Delta 2 è interessante osservare che sia soggetti TD che soggetti ASD presentano un adattamento tardivo al compito: queste evidenze sono parzialmente coerenti con quanto ipotizzato poiché ci si attende tale adattamento nel gruppo TD ma non in quello ASD. Inoltre, il gruppo ASD, soprattutto in adolescenza, presenta un adattamento tardivo migliore (punteggi Delta 2 più negativi) rispetto al gruppo TD. Questi risultati sembrano

suggerire che i partecipanti a sviluppo tipico sono in grado di adattarsi ai blocchi veloci, rallentando strategicamente la loro velocità di risposta a favore di una maggiore accuratezza. Pertanto, i partecipanti TD all'aumentare dell'età diventano sempre più bravi a flessibilizzare il controllo cognitivo adattivo indotto dalla predicibilità del contesto in relazione alla richiesta specifica dello stesso (in questo caso, l'inibizione). Ciò sembra non accadere nei partecipanti ASD, i quali mostrano un buon adattamento tardivo in termini di velocità di risposta ma sono risultati meno accurati dei partecipanti TD. Ciò potrebbe essere dovuto ad una difficoltà nell'adattarsi in maniera flessibile alle regolarità statistiche implicite del compito, alle scarse capacità inibitorie di questa popolazione clinica o, più probabilmente, ad entrambi i fattori. Questa visione è coerente con gli studi effettuati in letteratura che rilevano la presenza di una compromissione del controllo cognitivo nell'ASD (Pennington & Ozonoff, 1996, Solomon et al., 2008) e con i modelli neuropsicologici predittivi dell'ASD (Pellicano & Burr, 2012; Sinha et al., 2014; Lawson, Rees & Friston, 2014; van der Cruys et al., 2014). In particolare, come ipotizzato da van der Cruys et al. (2014), sembra che persone autistiche, in caso di variazioni del contesto probabilistico fra i diversi blocchi, non riescano a adattare il controllo cognitivo alle richieste implicite dell'ambiente a causa di una difficoltà nell'aggiornare i modelli predittivi interni dell'ambiente.

5.2 LIMITI

Il presente studio è caratterizzato da una serie di limiti che necessitano di essere approfonditi e discussi. In primo luogo, questa ricerca valuta l'ASD tramite un approccio categoriale: i partecipanti sono stati assegnati al gruppo ASD ed al gruppo TD sulla base della presenza o meno di una diagnosi di Disturbo dello Spettro dell'Autismo (ASD). Studi successivi, al fine di adottare un approccio trans-diagnostico allo studio del controllo cognitivo adattivo nello sviluppo atipico, dovrebbero considerare misure dimensionali relative alla sintomatologia autistica attraverso questionari, come ad esempio il *Social Communication Questionnaire* (SCQ; Rutter, Bailey & Lord, 2013), o strumenti di osservazione standardizzata, come ad esempio l'*Autistic Diagnostic Observation Schedule – second edition* (ADOS; Lord et al., 2012). In questo modo sarà possibile includere all'interno del campione anche persone con tratti autistici che, però, non presentano una compromissione funzionale tale da determinare una diagnosi: questo permetterebbe di ampliare il campione e di valutare effettivamente la presenza di una relazione fra fenotipo allargato dell'autismo (*Broader Autism Phenotype*, BAP; Ingersoll

& Wainer, 2014) e controllo cognitivo adattivo. Studi neurali e comportamentali (D’Cruz et al., 2013; Uljarević et al., 2017; Ambrosino et al., 2019, Knight et al., 2020), infatti, hanno individuato correlazioni significative fra controllo cognitivo adattivo e sintomi dell’ASD associati al dominio dei comportamenti ristretti e stereotipati ed al dominio sociocomunicativo. In secondo luogo, il DTP GNG (Mento et al., in prep.) è un compito particolarmente semplice, come dimostrato dagli elevati livelli di accuratezza riscontrati. Questa caratteristica potrebbe influenzare negativamente la sensibilità del compito, impedendo di fatto l’osservazione di una modulazione della velocità di risposta ai diversi blocchi, ossia un adattamento al contesto globale. È fondamentale che studi successivi modifichino la struttura del compito al fine di renderlo più motivante e sfidante. In terzo luogo, il campione reclutato presenta una numerosità limitata e risulta essere disomogeneo fra i diversi cluster. Studi successivi, condotti su campioni maggiormente numerosi ed omogenei, potrebbero mettere in luce differenze di performance fra i diversi blocchi e fra i diversi cluster di età che non sono state evidenziate dalle analisi condotte in questa ricerca. La numerosità limitata del campione, inoltre, non ha permesso di indagare la presenza di un’eventuale relazione fra controllo cognitivo adattivo ed il profilo emotivo-comportamentale individuale, rilevato ai questionari *Conners Parent Rating Scale - Revised* (Conners, 1997) e *Brief-2* (Marano et al., 2016).

5.3 IMPLICAZIONI IN AMBITO SPERIMENTALE E CLINICO

Le implicazioni del presente elaborato di ricerca coinvolgono sia l’ambito della ricerca sia l’ambito clinico. A livello sperimentale, questo studio sembra essere molto promettente in quanto non solo indaga una proprietà del controllo cognitivo ancora poco studiata, ma anche perché permette di comprendere i meccanismi predittivi nell’ASD che, secondo una serie di recenti studi (Pellicano & Burr, 2012; Sinha et al., 2014; Lawson, Rees & Friston, 2014; van der Cruys et al., 2014), sono compromessi. I risultati ottenuti, anche se non sembrano essere in completo accordo con quanto ipotizzato, permettono di trarre alcune significative considerazioni sul DTP GNG (Mento et al., in prep.) e, più in generale, su tale ambito di ricerca. In primo luogo, le evidenze ottenute suggeriscono che la richiesta di controllo inibitorio influenza le modalità con cui il controllo cognitivo adattivo viene implementato. Ciò conferma la natura estremamente flessibile e adattiva dello stesso in linea con la nuova visione del controllo cognitivo introdotta da Braem & Egner (2018) che considera tale costrutto come dinamico ed in grado di ottimizzarsi automaticamente in base alle caratteristiche e alle richieste del contesto. In secondo luogo,

le evidenze ottenute supportano la presenza di un deficit nella gestione strategica del controllo cognitivo adattivo in funzione dell'inibizione e di meccanismi predittivi atipici in ASD. È importante sottolineare come tali risultati necessitino di ulteriori studi al fine di essere confermati. Infine, è interessante notare come la presenza di differenze fra gruppo TD e ASD confermi la presenza di alterazioni a carico dei meccanismi di predizione temporale in individui con traiettorie evolutive atipiche, come suggerito da studi precedenti (Mento et al., 2020). Per questo motivo, potrebbe essere interessante estendere l'indagine del controllo cognitivo adattivo con il DTP GNG (Mento et al., in prep.) anche a popolazioni con altri disturbi del neurosviluppo (ad esempio, bambini con ADHD o con Disturbi Specifici dell'Apprendimento), al fine di effettuare studi cross-sindrome, in linea con un approccio neurocostruttivista allo studio del neurosviluppo. Studi cross-sindrome potrebbero chiarire la natura delle differenze nel DTP GNG (Mento et al., in prep.) fra TD e ASD. Per quanto riguarda le implicazioni in ambito clinico, il DTP GNG (Mento et al., in prep.) rappresenta un potenziale strumento di valutazione neuropsicologica; infatti, la brevità, la semplicità e l'utilizzo di stimoli meramente non-verbali rendono il DTP GNG (Mento et al., in prep.) uno strumento flessibile, utilizzabile con un'ampia gamma di bambini e agilmente somministrabile. Una futura validazione di questo compito consentirebbe per la prima volta l'introduzione nella pratica clinica di uno strumento volto ad indagare il controllo cognitivo adattivo.

Riassumendo i risultati della presente ricerca offrono degli interessanti elementi di riflessione rispetto alle capacità predittive e cognitive di persone con autismo. Inoltre, questo è uno dei primi studi che indaga il controllo cognitivo adattivo nell'ASD. Nonostante sia necessario effettuare ulteriori studi, il presente elaborato di ricerca sembra essere coerente con il nuovo costrutto di controllo cognitivo adattivo nello sviluppo tipico (Braem & Egner, 2018), con la presenza di una compromissione a carico del controllo cognitivo nell'ASD (Pennington & Ozonoff, 1996, Solomon et al., 2008) e con l'esistenza di meccanismi predittivi atipici in tale popolazione clinica (Pellicano & Burr, 2012; Sinha et al., 2014; Lawson, Rees & Friston, 2014; van der Cruys et al., 2014). Questi risultati incoraggianti sottolineano l'importanza di approfondire ulteriormente il presente ambito di ricerca.

BIBLIOGRAFIA

- Abrahamse, E., Braem, S., Notebaert, W., & Verguts, T. (2016). Grounding cognitive control in associative learning. *Psychological Bulletin*, *142*(7), 693–728. <https://doi.org/10.1037/bul0000047>
- Alvarez, J. A., & Emory, E. (s.d.). *Executive Function and the Frontal Lobes: A Meta-Analytic Review*. 26.
- Ambrosino, S., Bos, D. J., van Raalten, T. R., Kobussen, N. A., van Belle, J., Oranje, B., & Durston, S. (2014). Functional connectivity during cognitive control in children with autism spectrum disorder: An independent component analysis. *Journal of Neural Transmission*, *121*(9), 1145–1155. <https://doi.org/10.1007/s00702-014-1237-8>
- Amoruso, L., Narzisi, A., Pinzino, M., Finisguerra, A., Billeci, L., Calderoni, S., Fabbro, F., Muratori, F., Volzone, A., & Urgesi, C. (2019). Contextual priors do not modulate action prediction in children with autism. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *286*(1908), 20191319. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1319>
- American Psychiatric Association. (2014). *DSM-5: Manuale diagnostico e statistico dei disturbi mentali*. R. Cortina.
- *Baddeley, A. D. & Hitch, G. J. (1974) Working Memory. In G. H. Bower (Ed.), *The Psychology of learning and motivation* (Vol. 8). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. (1998). Working memory. *Comptes Rendus de L'Académie des Sciences (Life Sciences)*, *321*, 167-173.
- Baddeley, A. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, *4*, 829-839.
- Baron-Cohen, S. (2009). Autism: the empathizing–systemizing (E-S) theory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1156*(1), 68-80.

- Bejjani, C., Hoyle, R. H., & Egner, T. (2022). Distinct but correlated latent factors support the regulation of learned conflict-control and task-switching. *Cognitive Psychology*, *135*, 101474. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2022.101474>
- Beker, S., Foxe, J. J., & Molholm, S. (s.d.). *Oscillatory entrainment mechanisms and anticipatory predictive processes in children with autism spectrum disorder (ASD)*. 54.
- Bell, M. D., Imal, A. E., Pittman, B., Jin, G., & Wexler, B. E. (2019). The development of adaptive risk taking and the role of executive functions in a large sample of school-age boys and girls. *Trends in Neuroscience and Education*, *17*, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2019.100120>
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A Developmental Perspective on Executive Function: Development of Executive Functions. *Child Development*, *81*(6), 1641–1660. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x>
- Bettelheim, B. (1967). *Empty fortress*. Simon and Schuster.
- Bissett, P. G., & Logan, G. D. (2012). Post-stop-signal adjustments: Inhibition improves subsequent inhibition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *38*, 955–966. <http://dx.doi.org/10.1037/a0026778>
- Blackwell KA, Munakata Y. Costs and benefits linked to developments in cognitive control. *Developmental Science*. 2013;1–9. [10.1111/desc.12113](https://doi.org/10.1111/desc.12113)
- Boehler, C. N., Hopf, J. M., Stoppel, C. M., & Krebs, R. M. (2012). Motivating inhibition - reward prospect speeds up response cancellation. *Cognition*, *125*, 498 –503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cognition.2012.07.018>
- Botvinick, M. M., Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., & Cohen, J. D. (2001). *Conflict Monitoring and Cognitive Control*. 29.
- Braem, S., Bugg, J. M., Schmidt, J. R., Crump, M. J. C., Weissman, D. H., Notebaert, W., & Egner, T. (2019). Measuring Adaptive Control in Conflict Tasks. *Trends in Cognitive Sciences*, *23*(9), 769–783. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.07.002>

- Braem, S., & Egner, T. (2018). Getting a Grip on Cognitive Flexibility. *Current Directions in Psychological Science*, 27(6), 470–476. <https://doi.org/10.1177/0963721418787475>
- Braem, S., Verguts, T., & Notebaert, W. (2011). Conflict adaptation by means of associative learning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37(5), 1662–1666. <https://doi.org/10.1037/a0024385>
- Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control: A dual mechanisms framework. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(2), 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.12.010>
- Brock LL, Rimm-Kaufman SE, Nathanson L et al. (2009). The contributions of 'hot' and 'cool' executive function to children's academic achievement, learning-related behaviors, and engagement in kindergarten. *Early Child Res Q* 24: 337–349.
- Brooks P, Hanauer JB, Padowska B, Rosman H. 2003. The role of selective attention in preschoolers' rule use in a novel dimensional card sort. *Cogn. Dev.* 117:1–21
- Brown, J., Aczel, B., Jiménez, L., Kaufman, S. B., & Grant, K. P. (2010). Intact implicit learning in autism spectrum conditions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(9), 1789–1812. <https://doi.org/10.1080/17470210903536910>
- Buitelaar, J. K., Van der Wees, M., Swaab–Barneveld, H. A. N. N. A., & Van der Gaag, R. J. (1999). Theory of mind and emotion-recognition functioning in autistic spectrum disorders and in psychiatric control and normal children. *Development and psychopathology*, 11(1), 39-58.
- Burgess, G. C., & Braver, T. S. (2010). Neural Mechanisms of Interference Control in Working Memory: Effects of Interference Expectancy and Fluid Intelligence. *PLoS ONE*, 5(9), e12861. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012861>
- Cannon, J., O'Brien, A. M., Bungert, L., & Sinha, P. (2021). Prediction in Autism Spectrum Disorder: A Systematic Review of Empirical Evidence. *Autism Research*, 14(4), 604–630. <https://doi.org/10.1002/aur.2482>

- Caselli, M. C., & Vicari, S. (2017). *Neuropsicologia dell'età Evolutiva: Prospettive teoriche e cliniche*. Il mulino.
- Chevalier, N. (2015). Executive Function Development: Making Sense of the Environment to Behave Adaptively. *Current Directions in Psychological Science*, 24(5), 363–368. <https://doi.org/10.1177/09637214155593724>
- Chevalier, N., Martis, S. B., Curran, T., & Munakata, Y. (2015). Metacognitive Processes in Executive Control Development: The Case of Reactive and Proactive Control. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(6), 1125–1136. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00782
- Chiu, Y.-C., & Egner, T. (2019). Cortical and subcortical contributions to context-control learning. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 99, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.01.019>
- Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, 36(3), 181–204. <https://doi.org/10.1017/S0140525X12000477>
- Conner BT, Stein JA, Longshore D (2008). Examining selfcontrol as a multidimensional predictor of crime and drug use in adolescents with criminal histories. *J Behav Health Serv Res* 36: 137–149.
- Conners, C. K. (1997). *The Conners Rating Scales – Revised manual*. North Towanda: Multi-health Systems.
- Coull J, Nobre AC. Where and when to pay attention: the neural systems for directing attention to spatial locations and to time intervals as revealed by both PET and fMRI. *J Neurosci*. 1998; 18: 7426–35. PMID: 9736662
- Cragg L, Nation K. 2008. Go or no-go? Developmental improvements in the efficiency of response inhibition in mid-childhood. *Dev. Sci*. 11:819–27
- Crump, M. J., Brosowsky, N. P., & Milliken, B. (2017). Reproducing the location-based context-specific proportion congruent effect for frequency unbiased items: A reply to

- Hutcheon and Spieler (2016). *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(9), 1792-1807.
- Damasio, A. R., & Maurer, R. G. (1978). A neurological model for childhood autism. *Archives of neurology*, 35(12), 777-786.
- Davidson MC, Amso D, Anderson LC, Diamond A. Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*. 2006; 44:2037–2078. [PubMed: 16580701]
- Dawson, G., & Toth, K. (2006). Autism spectrum disorders. In D. Cicchetti & D. J. Cohen (Eds.), *Developmental psychopathology: Risk, disorder, and adaptation* (pp. 317–357).
- D’Cruz, A.-M., Ragozzino, M. E., Mosconi, M. W., Shrestha, S., Cook, E. H., & Sweeney, J. A. (2013). Reduced behavioral flexibility in autism spectrum disorders. *Neuropsychology*, 27(2), 152–160. <https://doi.org/10.1037/a0031721>
- D’Esposito M, Postle BR, Ballard D, Lease J. 1999. Maintenance versus manipulation of information held in working memory: an event-related fMRI study. *Brain Cogn*. 41:66–86
- Diamond A. 2002. Normal development of prefrontal cortex from birth to young adulthood: cognitive functions, anatomy, and biochemistry. In *Principles of Frontal Lobe Function*, ed. DT Stuss, RT Knight, pp. 466-503. London: Oxford Univ. Press
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135–168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A. (2020). Executive functions. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 173, pagg. 225–240). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64150-2.00020-4>
- Dibbets, P., & Jolles, J. (2006). The Switch Task for Children: Measuring mental flexibility in young children. *Cognitive Development*, 21(1), 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2005.09.004>

- D'Souza, D., Booth, R., Connolly, M., Happé, F., & Karmiloff-Smith, A. (2016). Rethinking the concepts of 'local or global processors': Evidence from Williams syndrome, Down syndrome, and autism spectrum disorders. *Developmental Science*, *19*(3), 452–468. <https://doi.org/10.1111/desc.12312>
- Duma, G. M., Granzio, U., & Mento, G. (2020). Should I stay or should I go? How local-global implicit temporal expectancy shapes proactive motor control: An hdEEG study. *NeuroImage*, *220*, 117071. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117071>
- Duma, G. M., Danieli, A., Morao, V., Da Rold, M., Baggio, M., Toffoli, L., ... & Mento, G. (2021). Implicit cognitive flexibility in self-limited focal epilepsy of childhood: An HD-EEG study. *Epilepsy & Behavior*, *116*, 107747.
- Duthoo, W., Abrahamse, E. L., Braem, S., Boehler, C. N., & Notebaert, W. (2014). The heterogeneous world of congruency sequence effects: An update. *Frontiers in Psychology*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01001>
- Egner, T. (2007). Congruency sequence effects and cognitive control. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *7*(4), 380–390. <https://doi.org/10.3758/CABN.7.4.380>
- Egner, T. (2014). Creatures of habit (and control): A multi-level learning perspective on the modulation of congruency effects. *Frontiers in Psychology*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01247>
- Farooqui, A. A., & Manly, T. (2015). Anticipatory Control Through Associative Learning of Subliminal Relations: Invisible May Be Better Than Visible. *Psychological Science*, *26*(3), 325–334. <https://doi.org/10.1177/0956797614564191>
- Feldman H, & Friston KJ (2010). Attention, uncertainty, and free energy. *Frontiers in Human Neuroscience*, *4*, 215. [PubMed: 21160551]
- Ferri, R., Elia, M., Agarwal, N., Lanuzza, B., Musumeci, S. A., & Pennisi, G. (2003). The mismatch negativity and the P3a components of the auditory event-related potentials in

- autistic low-functioning subjects. *Clinical Neurophysiology*, 114, 1671–1680.
doi:10.1016/S13882457(03)00153-6
- Folstein, S. E., & Rosen-Sheidley, B. (2001). Genetics of autism: complex aetiology for a heterogeneous disorder. *Nature Reviews Genetics*, 2(12), 943-955.
- Friedman, N. P., & Robbins, T. W. (2022). The role of prefrontal cortex in cognitive control and executive function. *Neuropsychopharmacology*, 47(1), 72–89.
<https://doi.org/10.1038/s41386-021-01132-0>
- Frith, U., & Happé, F. (1994). Autism: Beyond “theory of mind”. *Cognition*, 50(1-3), 115-132.
- Friston, K. (2010). The free-energy principle: A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 127–138. <https://doi.org/10.1038/nrn2787>
- Garon N, Bryson SE, Smith IM. 2008. Executive function in preschoolers: a review using an integrative framework. *Psychol. Bull.* 134:31–60
- Gathercole SE, Pickering SJ, Knight C, Stegmann Z. 2004. Working memory skills and educational attainment: evidence from National Curriculum assessments at 7 and 14 years of age. *Appl. Cogn. Psychol.* 18:1–16 Gazzaley A, Co
- Geurts, H. M., Corbett, B., & Solomon, M. (2009). The paradox of cognitive flexibility in autism. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(2), 74–82.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.11.006>
- Girardi, G., Fernandez, L. G., Leboyer, M., Latimier, A., Chokron, S., & Zalla, T. (2021). Temporal preparation in adults with autistic spectrum disorder: The variable foreperiod effect. *Autism Research*, 14(11), 2393-2404.
- Gonthier, C., & Blaye, A. (2021). Preschoolers are capable of fine-grained implicit cognitive control: Evidence from development of the context-specific proportion congruency effect. *Journal of Experimental Child Psychology*, 210, 105211.
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2021.105211>

- Gonthier, C., Zira, M., Colé, P., & Blaye, A. (2019). Evidencing the developmental shift from reactive to proactive control in early childhood and its relationship to working memory. *Journal of Experimental Child Psychology*, *177*, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.07.001>
- Goris, J., Braem, S., Nijhof, A. D., Rigoni, D., Deschrijver, E., Van de Cruys, S., Wiersema, J. R., & Brass, M. (2018). Sensory Prediction Errors Are Less Modulated by Global Context in Autism Spectrum Disorder. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, *3*(8), 667–674. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2018.02.003>
- Grisoni, L., Moseley, R. L., Motlagh, S., Kandia, D., Sener, N., Pulvermüller, F., Roepke, S., & Mohr, B. (2019). Prediction and Mismatch Negativity Responses Reflect Impairments in Action Semantic Processing in Adults with autism spectrum disorders. *Frontiers in Human Neuroscience*, *13*, 395. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00395>
- Hendrickson, N. K., & McCrimmon, A. W. (2019). Test Review: *Behavior Rating Inventory of Executive Function®*, Second Edition (BRIEF®2) by Gioia, G. A., Isquith, P. K., Guy, S. C., & Kenworthy, L. *Canadian Journal of School Psychology*, *34*(1), 73–78. <https://doi.org/10.1177/0829573518797762>
- Hogeveen, J., Krug, M. K., Elliott, M. V., Carter, C. S., & Solomon, M. (2018). Proactive control as a double-edged sword in autism spectrum disorder. *Journal of Abnormal Psychology*, *127*(4), 429–435. <https://doi.org/10.1037/abn0000345>
- Hughes C, White A, Sharpen J et al. (2000). Antisocial, angry, and unsympathetic: “hard-to-manage” preschoolers’ peer problems and possible cognitive influences. *J Child Psychol Psychiatry* 4: 169–179. <https://doi.org/10.1017/S0021963099005193>.
- Ingersoll, B., & Wainer, A. (2014). The broader autism phenotype. *Handbook of Autism and Pervasive Developmental Disorders, Fourth Edition*.

- Johnson, M. H., Griffin, R., Csibra, G., Halit, H., Farroni, T., de Haan, M., ... & Richards, J. (2005). The emergence of the social brain network: Evidence from typical and atypical development. *Development and psychopathology*, *17*(3), 599-619.
- Johnson, M. H., & De Haan, M. (2015). *Developmental cognitive neuroscience: An introduction* (Fourth edition). John Wiley and Sons, Inc.
- Johnson, K. A., Burrowes, E., & Coull, J. T. (2015). Children can implicitly, but not voluntarily, direct attention in time. *PLoS One*, *10*(4), e0123625.
- Kanner, L. (1943). Autistic disturbances of affective contact. *Nervous Child*, *2*, 217–250.
- Keehn, B., Brenner, L., Ramos, A., Lincoln, A., Marshall, S., & Muller, R. (2009). Brief report: Eye-movement patterns during an embedded figures test in children with ASD. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *39*, 383–387. doi:10.1007/s10803-008-0608-0
- Kemner, C., Verbaten, M. N., Cuperus, J. M., Camfferman, G., & van Engeland, H. (1995). Auditory event-related brain potentials in autistic children and three different control groups. *Biological psychiatry*, *38*(3), 150-165.
- Kendler TS, Kendler HH. 1959. Reversal and nonreversal shifts in kindergarten children. *J. Exp. Psychol.* *58*:56–60
- Kenny, L., Hattersley, C., Molins, B., Buckley, C., Povey, C., & Pellicano, E. (2016). Which terms should be used to describe autism? Perspectives from the UK autism community. *Autism*, *20*(4), 442–462. <https://doi.org/10.1177/1362361315588200>
- King, J. A., Korb, F. M., & Egner, T. (2012). Priming of control: Implicit contextual cuing of top-down attentional set. *Journal of Neuroscience*, *32*, 8192–8200.
- Knight, E. J., Oakes, L. A., Hyman, S. L., Freedman, E. G., & Foxe, J. J. (2020). *Individuals with autism have no detectable deficit in neural markers of prediction error when presented with auditory rhythms of varied temporal complexity* [Preprint]. *Neuroscience*. <https://doi.org/10.1101/2020.05.05.077438>

- Lawson, R. P., Rees, G., & Friston, K. J. (2014). An aberrant precision account of autism. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00302>
- Leekam, S., Tandos, J., McConachie, H., Meins, E., Parkinson, K., Wright, C., ... & Couteur, A. L. (2007). Repetitive behaviours in typically developing 2-year-olds. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 48(11), 1131-1138.
- Lepisto, T., Silokallio, S., Nieminen-von Wendt, T., Alku, P., Naatanen, R., & Kujala, T. (2006). Auditory perception and attention as reflected by the brain event-related potentials in children with Asperger syndrome. *Clinical Neurophysiology*, 117, 2161–2171. doi: 10.1016/j.clinph.2006.06.709
- Lezak M. 1983. Neuropsychological Assessment. New York: Oxford Univ. Press
- Lord C, Rutter M, DiLavore PC, Risi S, Gotham K, Bishop SL. *Autism Diagnostic Observation Schedule*. 2nd. Torrance, CA: Western Psychological Services; 2012
- Los, S. A. (2010). Foreperiod and sequential effects: theory and data. *Attention and time*, 289(302), 24.
- Los, S. A., Kruijne, W., & Meeter, M. (2017). Hazard versus history: Temporal preparation is driven by past experience. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(1), 78–88. <https://doi.org/10.1037/xhp0000279>
- Marano, A., Innocenzi M., Devescovi, A., D'Amico S. *adattamento italiano a cura di* (2016). Behaviour Rating Inventory Executive Function 2, assessment delle funzioni esecutive in età scolare (BRIEF-2), di Gerard A. Gioia, Peter K. Isquith, Steven C. Guy, PhD, Lauren Kenworthy, 2000, HOGEFREE Editore.
- Marzocchi, G. M., & Valagussa, S. (2011). *Le funzioni esecutive in età evolutiva: Modelli neuropsicologici, strumenti diagnostici, interventi riabilitativi*. Angeli.
- Mathôt S, Schreij D, Theeuwes J. OpenSesame: an open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behav Res Methods*. 2012 Jun;44(2):314-24. doi: 10.3758/s13428-011-0168-7. PMID: 22083660; PMCID: PMC3356517.

- Mento, G., & Granzio, U. (2020). The developing predictive brain: How implicit temporal expectancy induced by local and global prediction shapes action preparation across development. *Developmental Science*, 23(6). <https://doi.org/10.1111/desc.12954>
- Mento, G., Scerif, G., Granzio, U., Franzoi, M., & Lanfranchi, S. (2020). The Effect of Probabilistic Context on Implicit Temporal Expectations in Down Syndrome. *Frontiers in Psychology*, 11, 369. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00369>
- Mento, G. (2017). The role of the P3 and CNV components in voluntary and the automatic temporal orienting: a high spatial resolution ERP study. *Neuropsychologia*, 107, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.neuro psychologia.2017.10.037>
- Mento, G., & Tarantino, V. (2015). Developmental Trajectories of Internally and Externally Driven Temporal Prediction. *PLOS ONE*, 10(8), e0135098. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135098>
- Meuwissen, A. S., & Zelazo, P. D. (2014). *Hot and Cool Executive Function: Foundations for Learning and Healthy Development*. 6.
- Mirenda, P., Smith, I. M., Vaillancourt, T., Georgiades, S., Duku, E., Szatmari, P., ... & Zwaigenbaum, L. (2010). Validating the repetitive behavior scale-revised in young children with autism spectrum disorder. *Journal of autism and developmental disorders*, 40(12), 1521-1530.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49–100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Moffitt, T. E., Arseneault, L., Belsky, D., Dickson, N., Hancox, R. J., Harrington, H., Houts, R., Poulton, R., Roberts, B. W., Ross, S., Sears, M. R., Thomson, W. M., & Caspi, A. (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety.

Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(7), 2693–2698.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1010076108>

Morgan AB, Lilienfeld SO (2000). A meta-analytic review of the relation between antisocial behavior and neuropsychological measures of executive function. *Clin Psychol Rev* 20: 113–136. [https://doi.org/10.1016/S0272-7358\(98\)00096-8](https://doi.org/10.1016/S0272-7358(98)00096-8).

Morra, S., Panesi, S., Traverso, L., & Usai, M. C. (2018). Which tasks measure what? Reflections on executive function development and a commentary on Podjarny, Kamawar, and Andrews (2017). *Journal of Experimental Child Psychology*, 167, 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.11.004>

Niemi P, Näätänen R. Foreperiod and simple reaction time. *Psychol Bull.* 1981; 89: 133–162.

Nobre, A., Correa, A., & Coull, J. (2007). The hazards of time. *Current Opinion in Neurobiology*, 17(4), 465–470. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.07.006>

Nolen-Hoeksema, S., Fredrickson, B. L., Loftus, G. R. & Lutz, G. (2017). Intelligenza. In Nolen-Hoeksema, S., Fredrickson, B. L., Loftus, G. R. & Lutz, G. Atkinson & Hilgard's introduzione alla psicologia (pp. 444-467). Padova: Piccin Nuova Libreria S. p. A.

Oliver, A., Johnson, M. H., Karmiloff-Smith, A., & Pennington, B. (2000). Deviations in the emergence of representations: A neuroconstructivist framework for analysing developmental disorders. *Developmental Science*, 3(1), 1-23.

Passler, M. A., Isaac, W., & Hynd, G. W. (1985). Neuropsychological development of behavior attributed to frontal lobe functioning in children. *Developmental Neuropsychology*, 1(4), 349–370. <https://doi.org/10.1080/87565648509540320>

Shallice, T., & Warrington, E. K. (1974). The dissociation between short term retention of meaningful sounds and verbal material. *Neuropsychologia*, 12(4), 553–555. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(74\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0028-3932(74)90087-6)

- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, *18*(6), 643–662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>
- Pellicano, E., & Burr, D. (2012). When the world becomes ‘too real’: A Bayesian explanation of autistic perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(10), 504–510. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.08.009>
- Pelphrey, K. A., Shultz, S., Hudac, C. M., & Vander Wyk, B. C. (2011). Research review: constraining heterogeneity: the social brain and its development in autism spectrum disorder. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *52*(6), 631-644.
- Pennington, B. F., & Ozonoff, S. (1996). Executive functions and developmental psychopathology. *Journal of child psychology and psychiatry*, *37*(1), 51-87.
- Qualtrics. (2019). Qualtrics software [software]. Utah: Provo.
- Roberts, R. J., Hager, L. D., & Heron, C. (1994). Prefrontal cognitive processes: Working memory and inhibition in the antisaccade task. *Journal of Experimental Psychology: General*, *123*(4), 374.
- Roca M, Parr A, Thompson R, Woolgar A, Torralva T, et al. 2010. Executive function and fluid intelligence after frontal lobe lesions. *Brain* *133*:234–47
- Rueda, M. R., Fan, J., McCandliss, B. D., Halparin, J. D., Gruber, D. B., Lercari, L. P., & Posner, M. I. (2004). Development of attentional networks in childhood. *Neuropsychologia*, *42*(8), 1029–1040. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.012>
- Rutter M, Bailey A, Lord C. The social communication questionnaire: manual. Western Psychological Services; 2003.
- Sameroff, A. (2009). *The transactional model*. American Psychological Association.

- Schmidt, J. R. (2019). Evidence against conflict monitoring and adaptation: An updated review. *Psychonomic Bulletin & Review*, *26*(3), 753–771.
<https://doi.org/10.3758/s13423-018-1520-z>
- Shah, A., & Frith, U. (1993). Why do autistic individuals show superior performance on the block design task? *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *34*(8), 1351–1364.
- Shenhav, A., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2013). The Expected Value of Control: An Integrative Theory of Anterior Cingulate Cortex Function. *Neuron*, *79*(2), 217–240.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.07.007>
- Shoda, Y., Mischel, W., & Peake, P. K. (1990). Predicting adolescent cognitive and self-regulatory competencies from preschool delay of gratification: Identifying diagnostic conditions. *Developmental Psychology*, *26*, 978–986.
- Sinha, P., Kjelgaard, M. M., Gandhi, T. K., Tsourides, K., Cardinaux, A. L., Pantazis, D., Diamond, S. P., & Held, R. M. (2014). Autism as a disorder of prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(42), 15220–15225.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1416797111>
- Solomon, M., Ozonoff, S. J., Cummings, N., & Carter, C. S. (2008). Cognitive control in autism spectrum disorders. *International Journal of Developmental Neuroscience*, *26*(2), 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2007.11.001>
- Solomon, M., Ozonoff, S. J., Ursu, S., Ravizza, S., Cummings, N., Ly, S., & Carter, C. S. (2009). The neural substrates of cognitive control deficits in autism spectrum disorders. *Neuropsychologia*, *47*(12), 2515–2526.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.04.019>
- Tambelli, R. (2017). *Manuale di psicopatologia dell'infanzia*. Il mulino.
- Thillay, A., Lemaire, M., Roux, S., Houy-Durand, E., Barthélémy, C., Knight, R. T., Bidet-Caulet, A., & Bonnet-Brilhault, F. (2016). Atypical Brain Mechanisms of Prediction

- According to Uncertainty in Autism. *Frontiers in Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00317>
- Thorup, E., Nyström, P., Gredebäck, G. *et al.* Altered gaze following during live interaction in infants at risk for autism: an eye tracking study. *Molecular Autism* 7, 12 (2016). <https://doi.org/10.1186/s13229-016-0069-9>
- Uljarević, M., Richdale, A. L., Evans, D. W., Cai, R. Y., & Leekam, S. R. (2017). Interrelationship between insistence on sameness, effortful control and anxiety in adolescents and young adults with autism spectrum disorder (ASD). *Molecular Autism*, 8(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s13229-017-0158-4>
- Valenza, E., & Turati, C. (2019). *Promuovere lo sviluppo della mente: Un approccio neurocostruttivista*. Il Mulino.
- Van der Cruys, S., Evers, K., Van der Hallen, R., Van Eylen, L., Boets, B., de-Wit, L., & Wagemans, J. (2014). Precise minds in uncertain worlds: Predictive coding in autism. *Psychological Review*, 121(4), 649–675. <https://doi.org/10.1037/a0037665>
- Van Gaal, S., Ridderinkhof, K. R., Scholte, H. S., & Lamme, V. A. (2010). Unconscious activation of the prefrontal no-go network. *The Journal of Neuroscience*, 30, 4143–4150. <http://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2992-09.2010>
- Verbruggen F, Logan GD. 2008. Automatic and controlled response inhibition: associative learning in the go/no-go and stop-signal paradigms. *J. Exp. Psychol.: Gen.* 137:649–72
- Wacongne, C., Changeux, J. P., & Dehaene, S. (2012). A neuronal model of predictive coding accounting for the mismatch negativity. *Journal of Neuroscience*, 32(11), 3665-3678.
- White, S. J., Burgess, P. W., & Hill, E. L. (2009). Impairments on “open-ended” executive function tests in autism. *Autism Research*, 2, 138 –147. doi:10.1002/aur.78
- Williams, K., Tuck, M., Helmer, M., Bartak, L., Mellis, C., Peat, J. K., & the Autism Spectrum Disorder Steering Group. (2008). Diagnostic labelling of autism spectrum disorders in

NSW. *Journal of Paediatrics and Child Health*, 44(3), 108–113.

<https://doi.org/10.1111/j.1440-1754.2007.01232.x>

Wicks-Nelson, R., Israel, A. C. & Malatras, J. W., (2020). *Abnormal child and adolescent psychology*.

<http://www.vlebooks.com/vleweb/product/openreader?id=none&isbn=9781000198324>

Zero to three. (2018). *CD: 0-5: classificazione diagnostica della salute mentale e dei disturbi di sviluppo nell'infanzia*. Giovanni Fioriti.

Zelazo PD, Frye D, Rapus T. 1996. An age-related dissociation between knowing rules and using them. *Cogn. Dev.* 11:37–63

Zelazo, P. D., & Carlson, S. M. (2012). Hot and cool executive function in childhood and adolescence: Development and plasticity. *Child Development Perspectives*, 6, 354–360. doi: 10.1111/j.1750-8606.2012. 00246.x

Zwart FS, Vissers CTWM, van der Meij R, Kessels RPC, & Maes JHR (2017). Autism: Too eager to learn? Event related potential findings of increased dependency on intentional learning in a serial reaction time task. *Autism Research: Official Journal of the International Society for Autism Research*, 10(9), 1533–1543. [PubMed: 28448681]

RINGRAZIAMENTI

Innanzitutto, vorrei ringraziare di cuore tutte/i le/i bambine/i, le/i ragazze/i ed i genitori che hanno preso parte alla ricerca senza la cui collaborazione e fiducia non sarebbe stato possibile portare a termine questo studio. Ringrazio di cuore l'intera équipe dello studio multidisciplinare Fenice di Noale (VE) per la disponibilità avuta nell'insegnarmi questa professione e per la passione che sono riuscite a trasmettermi: un grazie particolare va ad Alessia Pollon e ad Ilaria Lissandron che hanno mediato le comunicazioni con i genitori ed i bambini che hanno preso parte al progetto. Si ringraziano le insegnanti e la dirigente della scuola "Pio X" di Tavo (Padova) per la collaborazione e la partecipazione alla ricerca.

Desidererei ringraziare, inoltre, il professor Giovanni Mento, referente del suddetto progetto di ricerca, per l'opportunità concessami e la professionalità con cui ha coordinato lo studio. Ringrazio di cuore anche la dott.ssa Lisa Toffoli che con cura, dedizione e disponibilità mi ha supportato nel processo di analisi dei dati e nella stesura dell'elaborato.

Infine, un grazie speciale a tutte le persone che sono state al mio fianco in questo percorso che, nel loro personale modo di essere, mi hanno sempre sostenuto ed hanno creduto in me. Grazie ai miei genitori, Anna e Raffaele; a mio fratello Marco; alle amiche di una vita, Cate, Vise, Banza e Ceci; agli amici della triennale che, nonostante le distanze, rimangono un punto di riferimento fondamentale; ed alle nuove amiche conosciute in magistrale che mi hanno accompagnato in questi due anni.