

[Te verschijnen in het Wetenschappelijk Tijdschrift Autisme]

Omgaan met onzekerheid binnen autisme

Sander Van de Cruys^{*1,2},

Kris Evers^{2,3,4},

Johan Wagemans^{1,2},

1 Laboratory of Experimental Psychology, Brain & Cognition, KU Leuven,
Leuven, Belgium;

2 Leuven Autism Research (LAuRes), KU Leuven, Leuven, Belgium;

3 Parenting and Special Education Research Unit, KU Leuven, Leuven, Belgium;

4 Child and Adolescent Psychiatry; UPC-Z.Org KU Leuven, Leuven, Belgium.

* Correspondentieadres: Sander Van de Cruys, Brain & Cognition, KU Leuven,
Tiensestraat 102, box 3711, 3000 Leuven, Belgium. Email: sander.vandecruys@kuleuven.be

Met dank aan Jo Bervoets, Eliane Deschrijver, Kristien Hens, Lies Mesens en Steven Vanmarcke voor hun erg geapprecieerd commentaar op eerdere versies van dit artikel. Sander en Kris zijn postdoctorale onderzoekers van het Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek – Vlaanderen (FWO). Johan geniet financiële steun van het Methusalem programma van de Vlaamse overheid (METH/14/02).

Samenvatting

In dit artikel geven we een toegankelijk overzicht van recent ontwikkelde ideeën over hoe mensen met autisme op een andere manier informatie verwerken en omgaan met onzekerheid, gebaseerd op de theorie van het brein-als-voorspeller. Zoals Sherlock het plot van een moord opbouwt om de geobserveerde sporen te verklaren en nieuwe sporen te voorspellen, zo bouwen ook de hersenen een model op van onze observaties en hoe ze veroorzaakt worden. Dat mentaal model wordt voortdurend bijgesteld in functie van voorspellingsfouten: de vergelijking van de voorspellingen die het model genereert met de werkelijk binnenkomende signalen van onze zintuigen. Niet elke voorspellingsfout moet echter even au sérieux genomen worden, gezien sommige fouten door ruis veroorzaakt worden of door variabiliteit in sensorische signalen die er niet toe doet (in een bepaalde situatie of taak). Voorspellingsfouten moeten dus een correct gewicht krijgen op basis van een inschatting van de onzekerheden in sensorische informatie. We leggen uit wat het belang hiervan is voor het leren en begrijpen van onze (sociale) omgeving en hoe moeilijkheden in de inschatting van het gewicht van voorspellingsfouten kunnen leiden tot de symptomen en het cognitief profiel dat bij autisme hoort.

Abstract

In this article, we provide an accessible overview of newly developed ideas about how people with autism process information and deal with uncertainty based on the predictive brain theory. Like Sherlock builds the plot of a murder to explain the traces observed at the scene of the crime and to predict new traces, the brain also builds a model of our observations and how they are caused. That mental model is constantly adjusted using prediction errors: the comparisons of the predictions that the model generates and the actual incoming signals of our senses. However, not every prediction error needs to be taken at face value, given that some errors are caused by noise or by variability in sensory signals that does not matter (in a particular situation or task). Prediction errors must therefore be given a correct weight based on an estimate of the uncertainties in the sensory information for a given context. We explain the importance of this for learning and understanding our (social) environment and how difficulties in

estimating the weight of prediction errors can lead to the symptoms and cognitive profile associated with autism.

We demand rigidly defined areas of doubt and uncertainty!

— Douglas Adams, 1979

1. Inleiding: autisme en onzekerheid

Moeilijkheden bij het omgaan met onzekerheid of onvoorspelbaarheid binnen autisme werden al sinds de allereerste omschrijvingen van het syndroom opgemerkt. Kanner (1943) had het over de autistische drang naar exacte herhaling en identieke gedragspatronen. Het hevig verzet tegen verandering is een andere uiting van de moeilijkheden met het verwerken van onzekerheden eigen aan het dagelijks leven. Zo beschreef O’Gorman (1967) enkele decennia later de autistische intolerantie voor de onvoorspelbaarheid van de werkelijkheid, in het bijzonder die veroorzaakt door mensen. Recent is er een hernieuwde interesse in het omgaan met onzekerheid in autismespectrumstoornis (ASS). Steeds vaker wordt gebruik gemaakt van de “Intolerance of Uncertainty” schaal, een vragenlijst die de gevoeligheid en emotionele reactie op dubbelzinnige of onzekere situaties en prikkels tracht te meten. Kinderen met ASS scoren hier meestal hoger op en die scores correleren sterk met angst, zintuiglijke gevoeligheden en repetitief gedrag (Boulter, Freeston, South, & Rodgers, 2014; Neil, Olsson, & Pellicano, 2016; Wigham, Rodgers, South, McConachie, & Freeston, 2015). Ten slotte zijn ook de moeilijkheden met het gebrek aan controle in ASS waarschijnlijk terug te voeren op de onvoorspelbaarheid die daaraan gekoppeld is (Robertson & Simmons, 2015).

Ondanks die erkenning van het belang van verwerking van onzekerheid in ASS, was er tot voor kort geen enkel verklarend model dat dit centraal plaatste. In dit artikel willen we een overzicht geven van ons eigen recent werk waarin we dit wel gedaan hebben (Van de Cruys et al., 2014; Van de Cruys, de-Wit, Evers, Boets, & Wagemans, 2013; Van de Cruys, Van der Hallen, & Wagemans, 2017). Voor alle duidelijkheid, ons uitgangspunt is niet dat mensen met ASS een irrationele zucht hebben naar zekerheid, of dat ze niet op abstract en bewust niveau zouden erkennen dat er in het leven erg weinig zekerheden zijn. Ieder mens zoekt naar een vorm van zekerheid, en als die balans al enigszins zoek is bij mensen met ASS, dan heeft dat vooral te maken met problemen op het onbewuste niveau van de informatieverwerking of

“onzekerheidsmindering”. Voor we tot ons voorstel voor ASS kunnen komen, moeten we dus eerst kort de neurocognitieve mechanismen bespreken die het brein gebruikt om onzekerheid over de wereld rondom ons te verminderen. Het omgaan met onzekerheid is immers een algemene cognitieve uitdaging. Dit geldt zowel voor perceptie, waar we vaak op basis van onvolledige of dubbelzinnige inputs een algemeen beeld moeten vormen, als voor actie, waar we vaak snel moeten handelen in een veranderlijke omgeving die slechts gedeeltelijk gekend is (Bach & Dolan, 2012). Onze hersenen moeten op deze uitdagingen dus een antwoord bieden. Hoe kunnen (neurotypische) mensen onzekerheid reduceren om met succes door de wereld te navigeren? Wat is onze beste verklaring van hoe (neurotypische) mensen onzekerheid reduceren om met succes door de wereld te navigeren (deel 2)? Kunnen we deze verklaring gebruiken om de karakteristieke problemen bij mensen met ASS beter te begrijpen (deel 3)?

2. Het brein-als-voorspeller

De ontknopning van een Sherlock Holmes verhaal verloopt vaak volgens hetzelfde stramien. Sherlock moet nog even een ogenschijnlijk onbeduidend feitje nagaan, en dan –bam!– vallen alle stukken op hun plaats, en presenteert hij triomfantelijk en met onbescheiden zekerheid zijn oplossing van de gepleegde moord. Sherlock zelf wist de oplossing al lang, in zijn hoofd bouwde hij het plot op waarmee de misdaad ten uitvoer kwam. Stuk voor stuk kreeg hij een idee over de manier waarop zijn observaties veroorzaakt werden door de acties van de moordenaar (bv. een peukje op de plaats delict). Zo vormde hij een mentaal model van het complete proces waarmee de misdaad “gegenereerd” werd, inclusief de motivaties van de moordenaar en de sporen van diens voorbereidingen. Om echt zekerheid te krijgen, gebruikt hij vervolgens zijn model om een voorspelling te doen die hij kan toetsen aan de werkelijkheid. Je zou het misschien niet zeggen maar de manier waarop Sherlock een model opbouwt om zijn observaties te verklaren en nieuwe voorspellingen te doen, heeft veel gemeen met hoe ons brein met zijn observaties omgaat (Koenderink, 2015).

Omdat onze waarneming zo moeiteloos en snel verloopt, lijkt het een directe afspiegeling te zijn van wat er zich in de wereld afspeelt. Dat dit niet per se het geval is,

blijkt vooral als het misloopt. Visuele illusies maken duidelijk dat context en verwachtingen continu onze perceptie kleuren. In het dagelijks leven valt het je bijvoorbeeld op als iemand van haarsnit veranderd is of wanneer iemand de bureauplant verplaatst heeft. Pas dan merk je dat je (onbewust) steeds verwachtingen hanteert in je omgang met de wereld. Je neemt niet passief de ruwe indrukken van buitenaf op, maar vergelijkt ze telkens meteen met de verwachtingen uit je eigen mentale modellen.

2.1 Het pro-actieve brein: noodzaak van verwachtingen

Hier helpt het om even vanuit het oogpunt van de hersenen zelf te denken. De hersenen hebben immers geen directe toegang tot de buitenwereld, ze hebben enkel neurale activiteit om op verder te gaan. Neurale activiteit die een bepaalde stand van zaken in de wereld representeert kan enkel afgetoetst worden op juistheid, met... nog meer neurale activiteit, namelijk de neurale signalen die van onze zintuigen komen. Dit gebrek aan een onafhankelijke toetssteen vangen de hersenen op door een erg proactieve instelling: de hersenen maken op basis van ervaring voortdurend voorspellingen over welke neurale activiteit ze als input zullen ontvangen en zullen dus niet puur passief prikkels ontvangen. Zo kunnen ze als-dan relaties leren, verwachtingen over wat in welke context zal volgen. Dat laat ons toe om snel en efficiënt te reageren en niet voortdurend achter de feiten aan te hollen. Elke sensorische prikkel die de hersenen bereikt, is immers eigenlijk al oud nieuws wanneer die daar aankomt, gegeven de vertraging door de neurale transmissie (die klein is maar niet verwaarloosbaar in een snel veranderende omgeving).

De proactieve instelling van onze hersenen zorgt er dus voor dat we mentale modellen kunnen opbouwen, *constructies* die telkens met inputs geconfronteerd en vergeleken kunnen worden. De maatstaf is niet hoe waarheidsgetrouw die constructies zijn (dat kunnen we nooit volledig vaststellen) maar wel of ze “werken”. Met andere woorden, laten ze ons toe om betere voorspellingen over de invloed van onze omgeving op ons eigen functioneren (of andersom) te maken? Dit verklaart waarom perceptie wel eens wordt beschreven als gecontroleerde hallucinatie: wat we zien zijn onze eigen constructies, in toom gehouden door sensorisch inputs.



Figuur 1: Dit is een zogenaamde “Mooney” afbeelding. Kan je ontdekken wat hier afgebeeld is? (zie figuur 3 voor de oplossing)

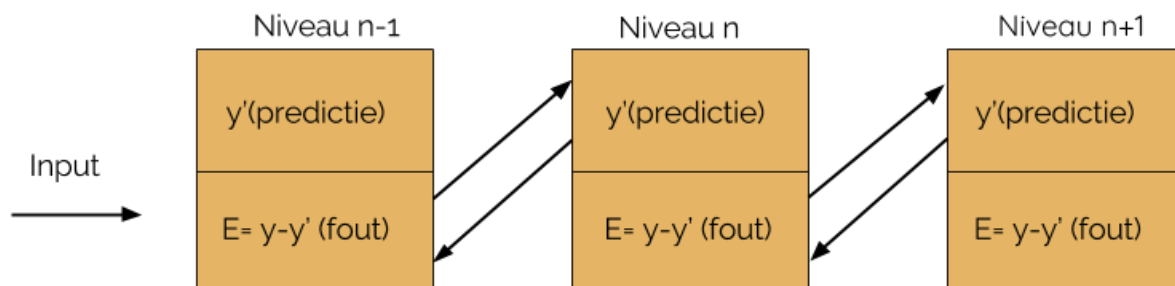
Neem het voorbeeld uit figuur 1. Vermoedelijk zie je die afbeelding als een verzameling zwarte en witte vlekken, met heel weinig herkenbare structuur of betekenis. Neem een moment om de afbeelding in je op te nemen, probeer om er iets zinnig in te zien en kijk dan naar de oplossing even verderop in deze tekst (figuur 3). Van zodra je die oplossing gezien hebt, vorm je je een mentaal model van hoe de afbeelding in figuur 1 gegenereerd is. Wanneer je dan terug naar die figuur kijkt, zal je die ook werkelijk anders ervaren (als een betekenisvolle foto van een kikker bijvoorbeeld i.p.v. als zwarte en witte vlekken). Meestal zal je nog nauwelijks naar je eerste “naïeve” waarneming van die afbeelding kunnen terugkeren. Hier zie je de kracht van je mentale modellen in actie, je ziet goed welke bijdrage je hersenen hebben in het vormen van je perceptuele ervaringen. De vervormde, ambigue afbeelding in figuur 1 lijkt misschien artificieel, maar het toont wel mooi aan hoe de hersenen voor elke prikkel te werk gaan: ze bouwen een “generatief model” (Sherlocks “plot”), een model over hoe de inkomende informatie uit onze zintuigen gegenereerd kunnen worden, door onderliggende, *latente oorzaken* in de wereld rondom ons te veronderstellen. In ons voorbeeld is die latente oorzaak een kikker, die inderdaad “verborgen” –want niet in de input gegeven– is, anders had je de kikker onmiddellijk herkend zonder naar de oplossing te kijken. Met andere woorden, we observeren telkens enkel de *effecten* die objecten in de wereld op onze zintuigen en zenuwstelsel hebben, niet de objecten zelf.

Die objecten als latente oorzaken van die effecten moeten de hersenen dus zelf achterhalen. Bij Sherlock zijn de latente oorzaken de motivaties en acties van de moordenaar die de observaties op de plaats delict verklaren. En net zoals bij Sherlock dienen onze generatieve modellen vervolgens als basis voor voorspellingen.

Hieruit mag blijken dat het “voorspellen” van de hersenen om veel meer gaat dan wat in ons dagdagelijks concept van “voorspelling” vervat zit. Op het niveau van de hersenen gaan de voorspellingen dus niet per se over de toekomst. Het gaat hier in de eerste plaats over “signaalvoorspelling”, over de manier waarop neurale signalen gereconstrueerd kunnen worden. Hersenregio’s trachten neurale activiteit in andere regio’s te recreëren, en dus te voorspellen, maar hoe hoger je in de hiërarchie van hersenregio’s gaat kijken, hoe globaler deze voorspellingen zijn, hoe meer plaats en tijd ze kunnen overspannen. Denk bijvoorbeeld aan wat je doet tijdens het lezen van een boek. Op het hoogste, meest abstracte niveau activeer je verwachtingen over de opeenvolging van gebeurtenissen doorheen het verloop van het boek (temporeel uitgespreid) op basis van wat je net gelezen hebt, op basis van eerdere verhalen, enz. Op een lager niveau, dat van de paragrafen en zinnen, activeer je voorspellingen van betekenissen en relaties die aan bod zullen komen. Nog lager koppel je aan die betekenissen bepaalde verwachtingen over welke woorden je waar verwacht. Op hun beurt hangen aan die woorden bepaalde verwachtingen over de locatie van welbepaalde letters vast. Ten slotte zullen die letters, op het allerlaagste niveau, voorspellingen over vormen, lijnen en oriëntaties activeren. Afhankelijk van hoe die letterkenmerken gecombineerd zijn, zullen er immers andere neuronen in de vroege visuele cortex geactiveerd worden. Zo kunnen meer abstracte verwachtingen dus “uitgepakt” worden in een hiërarchie van afhankelijke voorspellingen die uiteindelijk op het niveau van de retinale activiteit weerspiegeld zullen worden. De vlotheid waarmee we lezen is te danken aan deze voorspellende, hiërarchische activiteit, die ervoor zorgt dat we een tekst *zoals dzee nog setdes knunen lzeen* (op basis van context en begin/eindletters; Rayner, White, Johnson, & Liversedge, 2006).

2.2 Omgaan met onzekerheid: Wat met voorspellingsfouten?

Cruciaal is dat voorspellingen van hoger in de hiërarchie naar lagere regio's gestuurd worden, waar ze telkens vergeleken worden met de neurale activiteit in de lagere regio, de "input" (Clark, 2013; Lee & Mumford, 2003; Rao & Ballard, 1997). Het verschil tussen de voorspelde (gerecreëerde) signalen en de input wordt de "voorspellingsfout" genoemd, en deze signaleert dat er in de buitenwereld iets op ons inwerkt dat we nog niet helemaal in onze mentale modellen opgenomen hebben. Enkel die voorspellingsfouten worden voorwaarts gestuurd richting hoger gelegen hersenregio's, waar ze de voorspellingen kunnen bijstellen zodat een betere inschatting gemaakt kan worden van de latente oorzaken van de input signalen. Het werken met voorspellingsfouten zorgt ervoor dat de verwerkingscapaciteit toegespitst wordt op in het oog springende, informatieve elementen in de buitenwereld die niet met onze mentale modellen overeenkomen. Deze waarvoor onze modellen dus fout zaten. De twee centrale hypothesen van deze theorie over het functioneren van ons brein zijn dus enerzijds dat verwachte input-signalen "wegverklaard" zullen worden door voorspellingen van bovenaf, en anderzijds dat onvoorspelde stimuli een sterkere neurale activiteit zullen veroorzaken. In de jaren sinds het ontstaan van deze theorie is er heel wat bewijsmateriaal verzameld voor deze hypothesen (Alink, Schwiedrzik, Kohler, Singer, & Muckli, 2010; Egnér, Monti, & Summerfield, 2010; Egnér & Summerfield, 2013; Kok & de Lange, 2014; Wacongne et al., 2011). We vinden in dit model ook de reden waarom we onszelf niet kunnen kietelen: gezien we hier zelf de motorische commando's geven, zijn de tastprikkel volkomen voorspelbaar, en worden deze dus onderdrukt (Blakemore, Wolpert, & Frith, 1998).



Figuur 2: Een vereenvoudigde grafische voorstelling van de theorie van het brein-als-voorspeller.

Het vergelijken van voorspellingen met inputs herhaalt zich op de verschillende niveaus van verwerking en vormt zo een computationeel schema (figuur 2) dat zich richt op het verminderen van voorspellingsfouten op al die niveaus. In de praktijk kunnen voorspellingsfouten op twee complementaire manieren gereduceerd worden: enerzijds door onze modellen aan te passen en dus de voorspellingen te veranderen (via perceptie en leren) en anderzijds door de voorspelde dingen te veranderen (door “actie” dus). Door ons handelen in de wereld kunnen we delen van die wereld laten conformeren aan onze verwachtingen en modellen. De theorie van de voorspellende verwerking omvat dus niet enkel perceptie, maar ook leren en actie.

2.3 De oorzaken en precisie van voorspellingsfouten

De theorie zoals hierboven voorgesteld mist echter nog één essentieel ingrediënt. Dit wordt duidelijk met een voorbeeld. Stel dat je bus elke dag rond half acht aan je halte is, maar dat het exacte uur van dag tot dag wel eens durft te variëren. Je leert dan niet enkel te voorspellen wanneer je bus er gemiddeld genomen is, maar ook hoeveel variabiliteit er op de betrouwbaarheid van je schatting zit. Als je bus er vandaag dus nog niet is om vijf na half acht, zal je niet meteen veronderstellen dat het reisplan (je mentaal model over de bus) plots gewijzigd is, en dat je naar alternatief vervoer moet zoeken. Je weegt de afwijking (“voorspellingsfout”) af tegen de verwachte onzekerheid op je schatting (de “precisie” ervan). Die heb je immers geleerd op basis van je voorgaande ervaringen met de aankomsturen. Zo werkt elke voorspelling in perceptie: de hersenen voorspellen de inhoud van het percept (latente oorzaak van de sensorische input) én de daarbij horende precisie (oftewel de verwachte afwijking). Die laatste gebruiken we om het belang van voorspellingsfouten in te schatten en vervolgens meer of minder te laten doorwegen.

De bus komt nooit op exact hetzelfde tijdstip aangereden. Hetzelfde geldt voor afspraken met mensen. Je vriend zal nooit exact op het afgesproken uur aanbellen. Maar bij de ene persoon is de verwachte spreiding rond het afgesproken uur groter dan bij de andere. Een vergelijkbare variabiliteit doet zich echter ook voor bij meer basale

waarnemingen: Het gezicht van je vriend ziet er eigenlijk nooit exact hetzelfde uit. In het algemeen zijn geen twee ervaringen exact hetzelfde, dus perceptie kan nooit volledig vrij zijn van voorspellingsfouten. De bron van die voorspellingsfout kan liggen in de manier waarop de omgeving op ons inwerkt: je ziet je vriend vanuit een ongewone invalshoek of met een andere belichting. De voorspellingsfout kan ook liggen in veranderingen in de omgeving: je vriend's gezicht barst van vrolijkheid terwijl hij normaal eerder het onverstoorbare type is. Ze kan ook veroorzaakt zijn door de toevallige variabiliteit eigen aan onze natuurlijke omgeving: je vriend heeft langer of korter haar; of hij is bleker, bruiner of roder dan anders. Ten slotte kan de voorspellingsfout ook veroorzaakt zijn door ruis in onze zintuigen en neurotransmissie, die er voor zorgen dat sensorische informatie weer net iets anders is dan in het vorige moment. Bij al die bronnen van verandering mag het een wonder heten dat je je vriend steeds als je vriend herkent: ondanks een hoop voorspellingsfouten is onze waarneming verbazend stabiel. Niet al die voorspellingsfouten moeten immers even au sérieux genomen worden. Met andere woorden, ze hoeven niet allemaal te leiden tot aanpassingen van onze voorspellingen (perceptie) of updates van onze modellen (leren). We hebben dus een manier nodig om de impact van voorspellingsfouten te reguleren of te wegeen. Dit is geen kleine uitdaging, gezien de hersenen geen a priori informatie hebben over de bron van de opgepikte veranderingen in de input: vonden er werkelijke veranderingen in de omgeving plaats? Is het reisplan van de bus echt veranderd? Lag er een ongewone emotie op je vriend's gezicht? Of waren de veranderingen daarentegen simpelweg veroorzaakt door ruis of toevallige variabiliteit die de volgende keer weer anders zal zijn? Was de bus gewoon toevallig wat later of je vriend wat bleekjes?

Voorspellingsfouten door werkelijke veranderingen moeten leiden tot het verbeteren van onze modellen, maar die door ruis kunnen gerust genegeerd worden. Gelukkig zit er ook enige regelmaat in de aanwezigheid van ruis, en kunnen we dus op basis van eerdere ervaringen een inschatting maken van de verwachte variabiliteit in die context, ook wel de "precisie" genoemd. Denk aan onze verwachting over de precisie van de aankomsttijd van de bus, of onze verwachting over de typische kleurtinten van het gezicht van je vriend (is hij ziek of valt dit binnen zijn normale variatie?). In feite is ons doel dus de reduceerbare of "leerbare" onzekerheid te

onderscheiden van de niet-reduceerbare onzekerheid. In het eerste geval gaat het om een signaal dat we kunnen leren omdat het wijst op een nieuw verband dat zich in de toekomst zal verderzetten. In het tweede geval is het ruis die zich waarschijnlijk niet zal herhalen, en die we dus niet moeten proberen leren. In de kern gaat het hier dus om “meta-leren”: we leren wat er te leren valt door verschillende soorten onzekerheden uit elkaar te halen.

Je geleerde verwachtingen over de precisie van de zintuiglijke prikkels zullen dus de impact van die prikkels regelen. Als je bijvoorbeeld een gezicht tegenkomt in duisternis of mist, dan verminder je de invloed van de input die van slechte kwaliteit (weinig precies) zal zijn, ten voordele van je “top-down” voorspellingen. Die vullen in wat niet (precies genoeg) gegeven is in de “bottom-up” input. In het algemeen kunnen we op het lage niveau van de precieze vorm, kleur en positie van de elementen (neus, ogen, mond, enz.) heel wat variabiliteit tolereren zonder dat gezichtswaarneming of herkenning bemoeilijkt wordt. Dit komt deels omdat er heel wat voorspelbaarheden in een gezicht zitten (bv. als je weet waar de ogen zijn kan je een goede voorspelling maken over de plaats van de neus en mond) en deels omdat we op basis van onze enorme ervaring een inschatting kunnen maken over de mogelijke variabiliteit in de gezichten. Het gevolg is dat we ons meer kunnen beroepen op onze “top-down” voorspellingen in plaats van op de voorspellingsfouten, waardoor we onregelmatigheden in het gezicht vaak amper opmerken. Hier zie je dat de precisie-weging van voorspellingsfouten ook regelt of we voortgaan op onze modellen en op het globale plaatje (de top-down voorspellingen), dan wel blijven steken in de fijne details zoals ze gegeven zijn in de input-signalen (de “bottom-up” zintuiglijke input).



Figuur 3: Kijk nu terug naar figuur 1.

2.4 De aandachtsfilter

Hierboven deden we alsof het altijd duidelijk is wat ruis is en wat “signaal”. Dat is verre van het geval. Neem ons “lees”-voorbeeld: een tikfout lijkt ondubbelzinnig ruis te zijn als we een tekst lezen en dus kan zo’n fout rustig genegeerd worden. Als we ons doel echter veranderen, bijvoorbeeld wanneer we geïnteresseerd zijn of de schrijver een erg zorgvuldig persoon is, dan wordt die tikfout plots een relevant signaal. Hetzelfde zagen we wanneer een random feitje (bv. een peukje op een welbepaalde plaats) een erg informatief ‘signaal’ wordt voor Sherlock als hij ernaar kijkt met een bepaald (moord)plot (zijn generatief model) in gedachten. Dit geeft aan dat relevantie en precisie van voorspellingsfouten erg afhankelijk zijn van de gebruikte voorspellingen, oftewel onze “vragen” aan de data (Koenderink, 2015).

Omdat signaal en ruis relatieve begrippen zijn (afhankelijk van context en model), is een flexibele scherpstelling van de precisie van voorspellingsfouten noodzakelijk. Door bepaalde voorspellingsfouten zwaarder te laten doorwegen dan andere, wordt precisieregulatie in zekere zin ook een mechanisme van *aandacht*. Het werkt als een filter die het volume van bepaalde zintuiglijke informatie opendraait, terwijl andere informatie wordt gedempt. Zo worden de voorspellingsfouten geselecteerd die in deze context relevant zijn voor de geactiveerde voorspellingen van de waarnemer. Als je bijvoorbeeld wil herkennen welke emotie je gesprekspartner voelt, is de aanwezigheid van een snor een stukje informatie dat geen effect mag hebben op het bepalen van een emotionele expressie. Maar bewegingen in bepaalde aangezichtsregio’s zijn wel

indicatief, en dus van invloed op je voorspellingen over de emotionele toestand van je partner. Als je daarentegen de identiteit van je gesprekspartner wil achterhalen, is die snor vaak wel een belangrijk stukje informatie (en andere elementen minder). Het ongelijk en flexibel laten doorwegen van stukjes zintuiglijke informatie is wat we aandacht noemen en is dus een andere rol van precisie-inschatting.

Hiermee hebben we de belangrijkste principes van de theorie van het brein-als-voorspeller overlopen, en zal duidelijk zijn waarom deze theorie ons de neurocognitieve mechanismen geeft van onzekerheidsmindering (of “voorspellingsfout-reductie”). Onzekerheid (precisie) monitoren en gebruiken in het wegen van voorspellingsfouten is cruciaal om werkende, flexibele modellen van de werkelijkheid op te bouwen. De theorie omvat een nog concretere uitwerking van de precieze principes (in termen van Bayesiaanse statistiek) en hun realisatie in onze neurale circuits, maar dit overzicht volstaat om de toepassing op ASS te begrijpen.

3. De toepassing op ASS: Wat als je te precies wil zijn?

Wat gebeurt er als de inschatting van de precisie misloopt? Wat als je de zintuiglijke prikkels bijvoorbeeld steeds te precies inschat? Als je bij de minste vertraging van je bus vreest dat het hele busschema overhoop gehaald is? Of als je je vriend die net bij de kapper is geweest door die nieuwe haarsnit nauwelijks herkent? Deze voorbeelden laten twee mogelijke gevolgen van problemen met precisie-regulatie zien. Enerzijds kan een cognitief systeem overhaaste conclusies gaan trekken als het gewicht van voorspellingsfouten te hoog wordt ingeschat (“Het busschema is overhoop gehaald!”). Anderzijds komt het systeem soms gewoon niet tot een conclusie omdat verkeerde informatie een te hoog gewicht kreeg en bruikbare informatie een te laag gewicht. Met andere woorden, de filter die cruciaal was voor een efficiënte, flexibele interactie met je (sociale) omgeving, is defect. Hier komen we terecht bij een cognitief profiel dat we herkennen in mensen met ASS. We noemden deze theorie “HIPPEA” voor hoge, inflexibele precisie van voorspellingsfouten (“prediction errors” in het Engels) in autisme (Van de Cruys et al., 2014, 2013, 2017). We denken dat de hoge precisie van voorspellingsfouten op de lage sensorische niveaus

van verwerking ervoor zorgt dat irrelevante, toevallige variabiliteit of ruis onvoldoende onderdrukt of “uitgefilterd” wordt. Voorspellingsfouten veroorzaakt door deze variabiliteit zullen onterecht een grote impact hebben, wat betekent dat ze aandacht zullen trekken en tot nieuw leren zullen leiden (omdat hoge precisie voor het cognitief systeem betekent dat de mentale modellen geüpdatet moeten worden). Volgens de HIPPEA-theorie ligt dit aan de basis van de sensorische overbelasting (“sensory overload”) in ASS. Omdat precisie ook zorgt voor de selectie van stimuli, bijvoorbeeld binnen het visuele veld, zal een uniform hoge precisie ook leiden tot overprikkeling: te veel inkomende informatie wordt als relevant beschouwd.

Neurotypische individuen zullen gaandeweg leren om ruis te negeren op basis van hun modellen over de verwachte aanwezigheid van die ruis in de context in kwestie. Het cognitief systeem van mensen met ASS zal het hier lastiger hebben. Het zal ruis toch als belangrijk blijven beschouwen ook al is deze niet informatief. Dit zorgt ervoor dat (de hersenen van) mensen met ASS vruchteloos cognitief werk verrichten (Zaidel, Goin-Kochel, & Angelaki, 2015). Vooral wanneer verschillende sensorische signalen uit verschillende zintuigen strijden voor de aandacht, zoals bijvoorbeeld in sociale situaties, is het van cruciaal belang om autonoom te kunnen selecteren welke signalen bij de huidige taak en context horen. Een typisch voorbeeld is een feestje, waar je probeert het verhaal van je vriend te volgen ondanks heel wat achtergrondgeruis. Neurotypische mensen zullen hier, na een aanpassingstijd (leren negeren van de ruis), meestal erg goed in slagen. Wanneer deze selectie echter niet gebeurt, blijft het cognitief systeem hangen in irrelevante details in achter- en voorgrond, omdat de “bottom-up” signalen zo sterk doorwegen. Het matchen van voorspellingen blijft dan steken op de lagere niveaus, wat betekent dat meer abstracte voorspellingen over het groter geheel –in dit geval het verhaal dat je vriend met handen en voeten probeert over te brengen– niet of veel trager geactiveerd worden (Van der Hallen, Evers, Brewaeys, Van den Noortgate, & Wagemans, 2015).

Omwille van de hoge precisie verwacht het cognitieve systeem dan immers steeds een quasi-exacte overeenstemming tussen de hiërarchische voorspellingen en de sensorisch input. Zoals hierboven beschreven is dit echter zelden het geval in onze alledaagse omgeving. Als die er niet is, beschouwt het systeem het als een uitzondering, verschillend van de “regel” of van voorgaande ervaringen. De ervaring

wordt als het ware opgeslagen zoals ze was in al haar details, als exemplaar in plaats van als categorie. Dit verklaart ook mogelijk waarom mensen met autisme soms eigenaardige woorden (neologismen) gebruiken om zich uit te drukken: de ervaring verdient voor hen een apart woord, omdat ze niet hetzelfde is als degene die wordt aangeduid met het gebruikelijke woord. De specifieke manier van verwerking in ASS zorgt dus voor minder *generalisatie* van het leren, omdat het aangeleerde patroon zo specifiek is dat het zelden toegepast kan worden op nieuwe ervaringen, nieuwe data. De buitenwereld ziet dit vaak als een starheid in het gedrag. Om bij ons voorbeeld van het lezen te blijven: een tekst in een nieuw lettertype zal in verhouding meer hinder veroorzaken voor dit systeem. Hetzelfde geldt voor het verstaan van een gesprekspartner met een nieuw accent.

Let wel, het cognitief systeem van mensen met ASS heeft op zich geen probleem met het leren van de voorspelbare patronen in de omgeving. Dat wordt gestaafd door heel wat experimentele studies (waarin ze soms zelfs beter leren dan neurotypische mensen) en door hun sterke vertegenwoordiging in heel wat beroepsgroepen (ICT, ingenieurs, exacte wetenschappen). Het uit zich ook in de vaak gerapporteerde drang naar routines en rituelen in ASS. Die laatste tonen aan dat er wel degelijk specifieke, sterke verwachtingen aangeleerd zijn. Het toepassen van die modellen op andere situaties is echter wel vaak problematisch, omdat de meer abstracte hiërarchie van voorspellingen later en soms incompleet opgebouwd wordt.

3.1 Sociale symptomen verklaard

Een belangrijke categorie van die meer abstracte voorspellingen zijn de sociale voorspellingen, hoewel ze in feite niet verschillen van andere, niet-sociale voorspellingen. Neem opnieuw het voorbeeld van een vriend die je tegenkomt op straat. Ons visueel systeem analyseert een verandering in de input op je netvlies en wijst die toe aan een arm die opgestoken wordt (de latente oorzaak), maar daar stopt de analyse niet. Op zijn beurt wordt de opgestoken arm veroorzaakt door een achterliggende oorzaak: de intentie van je vriend om jou goeiedag te zeggen of je te wenken (afhankelijk van het gebaar). Een mentale toestand zoals een bedoeling of een

emotie is ook simpelweg een achterliggende, onzichtbare oorzaak van bepaalde input-signalen die je krijgt van een sociale partner, bijvoorbeeld: een blij gemoed verklaart een verandering in het gezicht (een blijde expressie). In zekere zin zijn intenties of emoties gewoon dieper “verborgen” achter de sensorisch input, waardoor we ook hogere hiërarchische modellen (met meer niveaus) nodig hebben om ze te begrijpen. Een verandering in je sensorische input kan bijvoorbeeld veroorzaakt zijn door een arm die uitgestoken wordt, zoals door een fietser op de baan voor je, die daarmee zijn intentie duidelijk maakt om veilig over te steken. Die intentie als oorzaak van het gebaar kan je enkel achterhalen en omzetten in aangepast gedrag (bv. de fietser laten oversteken) als je zelf de juiste hiërarchische modellen over de sociale verwachtingen (“regels”) in het verkeer geleerd hebt.

Een extra moeilijkheid bij mentale toestanden als “verborgen” oorzaken is dat één en dezelfde intentie of emotie heel wat verschillende sensorische inputs (uitspraken, gebaren of expressies) kan veroorzaken. De juiste verbanden leggen is dus niet altijd eenvoudig. Misschien knikt je vriend met zijn hoofd in plaats van zijn hand op te steken om jou te begroeten. Of stak hij zijn hand op om me te doen stoppen om een aanrijding met de fietser te voorkomen. Denk bijvoorbeeld ook aan ironie, waarbij dezelfde expressie op het omgekeerde gevoel kan wijzen, of aan groepstaal (bv. jongerentaal) waar bepaalde expressies een volledig andere emotie of intentie kunnen aannemen. De context is hier cruciaal om in te schatten wat relevant is en wat niet. Sowieso is er in sociale situaties ook altijd heel wat irrelevante variabiliteit (ruis) aanwezig in de verschillende zintuigen (denk aan het gesprek op het feestje). In zulk een veranderlijk, contextgebonden domein zal het afleiden van latente oorzaken moeizamer verlopen als je een verwerkingsprofiel hebt waarbij je sterk afhankelijk bent van de specifieke sensorisch kenmerken van de input. Daarom kunnen we zeggen dat het sociale domein in verhouding sterker verstoord wordt door problemen in het wegen van voorspellingsfouten, ook al zijn de sociale voorspellingen op zich in essentie niet verschillend van andere voorspellingen.

De sociale symptomen binnen ASS komen dus niet zozeer voort uit een onvermogen om emoties of intenties te herkennen (als latente oorzaken van geobserveerd gedrag). Het afleiden van sociale oorzaken is meestal gewoon veel moeilijker omdat we erg flexibel omspringen met voorspellende relaties in het sociale

domein (ongeschreven “regels”), wat de variabiliteit in uitingsvormen enorm doet toenemen. Gebruik ik een hoofdknik of een ander gebaar voor een groet? Of groet men elkaar hier helemaal niet? Vergeet hij te groeten of wil hij iets duidelijk maken door me niet gedag te zeggen? Het autonoom filteren van wat relevante en irrelevante informatie is, via het toewijzen van onzekerheden aan veranderde sociale afspraken dan wel aan toevalligheden, is hier essentieel. Dat is niet het geval bij achterhalen van mechanische (in plaats van sociale) processen (bijvoorbeeld van een klok of een kraan).

Het autonoom en contextgebonden filteren van de informatieve voorspellingsfouten wordt bemoeilijkt doordat er aan voorspellingsfouten een uniform hoge precisie wordt toegekend. ASS gaat dus niet over een tekort aan info (bv. sociale info) maar over *een overdaad aan betekenis of relevantie*. Uiteraard kunnen er pas voorspellingsfouten gevormd worden indien de voorspellingen eerst geleerd en vervolgens geactiveerd worden. Stel dat je enkel leerde dat een gebaar met die specifieke kenmerken een groet was (platte hand, uitgestoken net boven het hoofd, lichte zwaaibeweging, enz.), zonder te leren dat er heel wat variatie mogelijk is in hoe dat gebaar precies wordt uitgevoerd. Dan zal je van iemand die als groet pakweg twee vingers opsteekt de intentie moeilijker kunnen achterhalen. Precieze voorspellingsfouten op de lagere niveaus beletten dus dat er geschikte hogere, abstracte modellen gevormd worden over mentale toestanden als spaarzame verklaringen voor heel wat sensorische input. Met name die input die het complexe gedrag van onze sociale partner genereert. Het resultaat zijn modellen die overdreven specifiek en complex zijn en die bovendien de sensorische inputs van elke nieuwe (sociale) situatie veel minder efficiënt kunnen verklaren.

Heel ons sociaal weefsel en onze dagdagelijkse interacties berusten op adequate, gedeelde voorspellingen over verwacht gedrag, en mogelijke sociale “scenario’s”. Problemen in het opbouwen van die sociale voorspellingen leiden tot stroeve contacten en misverstanden. Die problemen kent iedere globetrotter die strandt in een compleet nieuwe cultuur, maar is een aanhoudende uitdaging voor iemand met autisme. Niet omdat ze zich minder zouden kunnen inleven in andermans gedachten, of omdat ze deel van een sociale brein zouden missen, wel omdat de sociale “leerstof” sterk berust op een precisie-inschatting die wat hapert binnen ASS.

3.2 Zelf voorspelbaarheid creëren

Een cognitief systeem dat hiermee te kampen heeft, heeft echter nog een andere uitweg, zoals we zagen in het deel over voorspellende verwerking. In plaats van zijn modellen te updaten om voorspellingsfouten te verkleinen, kan het cognitief systeem ook zo handelen dat inputs meer voorspelbaar worden. Je verandert dus de wereld daarbuiten zodat die beter overeenkomt met je modellen (in plaats van omgekeerd). Een evidente manier om hiernaar te “handelen” is door vermijding: het zich terugtrekken uit het “domein” dat (te) veel niet-te-onderdrukken voorspellingsfouten bevat, en het opzoeken van andere, bekendere omgevingen, waarvoor men de juiste modellen wél bezit. Sociaal vermijdingsgedrag binnen ASS moet volgens HIPPEA dan ook op deze manier begrepen worden. Dit heeft natuurlijk ook tot gevolg dat mensen met ASS hiermee zichzelf onbedoeld de kans ontzeggen om hun “sociale” modellen te verbeteren.

In het creëren van hun eigen voorspelbare “niche” kunnen we een ander kernsymptoom van ASS herkennen: de repetitieve en stereotiepe gedragspatronen en interesses. De routines en motorische maniërismen hebben ogenschijnlijk weinig objectief nut, maar vormen een manier (of een poging) om terug te keren naar een aanvaardbare graad van onzekerheid. Een persoon met autisme kan bijvoorbeeld een routine hebben waarbij alle kussens in een regelmatig patroon in de zetel moeten gelegd worden (en zijn huisgenoten ook vragen om daarmee rekening te houden). Per definitie zijn de sensorische veranderingen die het systeem zelf initieert (zelf-stimulatie) door middel van routines and rituelen immers veel voorspelbaarder. Gelijkaardig hieraan bieden de monomane interesses binnen ASS vaak een (deels) zelf-gevormde niche waarin er wel variabiliteit (onzekerheid) aanwezig is, maar dit enkel in een bepaalde set van welbepaalde domein-specifieke dimensies. Bij kinderen met ASS bevindt de variabiliteit zich daarbij meestal ook voornamelijk op laag-perceptueel niveau (bv. grootte of kleur van speelgoedauto's). Maar de voorspelbare niche kan ook erg complex zijn: Volwassenen met ASS verdiepen zich bijvoorbeeld tot in de kleinste details in een fictieve wereld uit een boek of film. Anderen voelen zich misschien beter thuis in de omgeving van computers dan in de buurt van andere mensen. Dit vooral

omwille van de precieze controle en de betrouwbare interacties die met een computer mogelijk zijn (zie bv. Newman, 2014).

3.3 Motivatie & emotie

Het lijkt dus niet zo te zijn dat een volledig voorspellingsfout-vrije omgeving wordt gezocht, maar wel één waarin de voorspellingsfouten hanteerbaar, en dus reduceerbaar, zijn. Voor iedereen – ook voor mensen met ASS – is intrinsieke motivatie gedreven door het boeken van voorspellende vooruitgang. Het actief reduceren van voorspellingsfouten wordt met andere woorden als emotioneel positief (belonend) ervaren. Omgekeerd leiden toenemende, niet-reduceerbare voorspellingsfouten tot frustratie en zelfs angst. De (sociale) angst die vaak aanwezig is in ASS kan dus gezien worden als een uitvloeisel van onaangepaste precisie van voorspellingsfouten. Het opzoeken van een bepaalde niche of inputdomein met meer of minder onzekerheid wordt dan een indirecte vorm van emotieregulatie.

Idealiter verkennen we zo veel mogelijk selectief die regio's uit onze omgeving die ons toelaten voorspellingsfouten te reduceren, en vermijden we de regio's die nog te complex zijn (waarvoor we helemaal nog geen gepaste modellen hebben). Ook die regio's waarin alles al geleerd is (en mentale modellen dus niet meer verbeterd kunnen worden), en alle rest-onzekerheid dus ruis is, laten we beter links liggen. En laat nu net een goede inschatting van onzekerheden cruciaal zijn voor het uitzoeken van de meest interessante omgevingsregio's (niet te complex, niet te simpel; precies goed). Daarbij zijn, zoals we eerder zagen, goede precisie-schattingen nodig om te weten waar de betrouwbare (en dus reduceerbare) voorspellingsfouten gelegen zijn. Zo voorkomt het cognitief systeem dat er tijd wordt gependend in een domein dat nog te moeilijk is, of dat geen leerbare verbanden meer bezit (te eenvoudig of te ruzig), voor de huidige voorspellende modellen. In de praktijk betekent dit dat de persoon zich zal ontwikkelen doorheen een aantal stadia met toenemende moeilijkheidsgraad, zoals we dat bij neurotypische kinderen zien. Dit verloopt veel moeizamer bij mensen met ASS, zoals te verwachten op basis van de rol van verwachte onzekerheden in dit proces. Mensen met ASS vinden met hun nauwe interessedomein(en) zeker ook hun "niches" waar ze voorspellende vooruitgang kunnen maken, maar in plaats van een autonome

progressie doorheen stadia moeten ze veeleer steunen op externe precisie-bijsturing. Dit laatste betekent dat zorgverleners of ouders de variabiliteit en onzekerheid van een (leer)situatie eerst moeten beperken en daarna eventueel geleidelijk terug kunnen opvoeren. Zorgverleners kunnen onzekerheid in de omgeving van iemand met autisme reduceren door eenduidigere verbanden te forceren of variatie te beperken. Ze doen dit bijvoorbeeld in sociale training, door vaste vraag-antwoord patronen aan te leren voor dagdagelijkse sociale situaties. Dit haalt de nood weg om aan precisie-schatting te doen, maar leidt uiteraard niet noodzakelijk tot een goede toepassing van die patronen in natuurlijke situaties die deze onzekerheid wel bevatten. Onderzoek zal moeten uitwijzen in welke mate het gradueel laten toenemen van onzekerheid en variatie, het vermogen tot generalisatie verbetert.

De slotsom hier is dat heel wat kernsymptomen van ASS een plausibele verklaring vinden in HIPPEA. Dit verklaringsmodel verduidelijkt ook waarom ASS bij uitstek een ontwikkelingsstoornis is, die alle domeinen van functioneren tot op zekere hoogte beïnvloedt, maar ook grote individuele verschillen vertoont in de ernst en de aard van cognitieve en emotionele moeilijkheden. De ernst van iemands problemen is daarbij sterk afhankelijk van de mate waarin diens precisie-inschatting verstoord is, maar evenzeer van de externe steun waarop de persoon kan rekenen en diens bereikte “fit” met de omgeving.

4. Slot: Wat brengt HIPPEA bij voor ASS?

Belangrijk is dat deze theorie geen schotten plaatst tussen “afwijkend” en “normaal” gedrag, integendeel, ze is geënt op een theorie over neurotypische cognitie, namelijk die van het brein-als-voorspeller. Heel wat van de kenmerken die we omschreven als het autistische cognitieve profiel kunnen ook (tijdelijk) aanwezig zijn in neurotypische ontwikkeling. Dit laat een nuance (een “spectrum”) toe die heel wat eerdere modellen niet hadden. HIPPEA biedt een mechanisme om de ongewone informatieverwerking in ASS beter te begrijpen. Dit geeft ons ook beter vat op de vage, beschrijvende concepten uit de traditionele theorieën voor ASS, zoals “geestesblindheid” (“mindblindness”; Baron-Cohen, Leslie, & Frith, 1985),

“contextblindheid” (Vermeulen, 2009), “executieve dysfunctie” (Hill, 2004) of “zwakke globale coherentie” (Frith & Happé, 1994).

Deze traditionele verklaringenmodellen zijn vaak gebaseerd op beperkingen (bv. *geestesblindheid* of *contextblindheid*). Hoewel een probleem in precisie-inschatting heel wat moeilijkheden kan teweegbrengen bij het verwerken van context en sociale situaties (zoals beschreven), en het dus ook ernstig lijden kan veroorzaken, vindt HIPPEA eerder aansluiting bij de “neurodiversiteit” beweging. Het verschil tussen problemen en aangepast gedrag is bijvoorbeeld vaak een kwestie van de fit (of het gebrek daaraan) met de omgeving. Bovendien zijn er zowel in het lab als daarbuiten taken, beroepen en activiteiten te vinden waarin mensen met ASS het even goed of zelfs beter doen dan neurotypische individuen (taken waarin hun versterkte voorspellingsfouten een voordeel bieden). Nog belangrijker is dat HIPPEA het onderscheid tussen relevante signalen en ruis centraal stelt. Maar wat relevant signaal is, en wat ruis, hangt af van de “vragen” of doelen die je stelt, en dus de voorspellingen die je activeert. Enkel als we ervan uitgaan dat er een normatieve set voorspellingen geldt voor een bepaalde taak, kan je stellen dat wie ze niet gebruikt tot suboptimale prestatie komt (“deficit”). Als je bepaalde input-veranderingen oppikt die een ander niet opmerkt, kan dit relevant zijn voor andere doelen, ook al komt dit soms niet overeen met de normatieve, sociaal-verwachte taakprestatie. Soms bevat buiten de lijntjes kleuren de kiem van creativiteit. Bovendien is het “verwerpen” van ruis een feilbaar proces. Of ruis wel degelijk ruis was, wordt vaak pas duidelijk wanneer modellen getest worden met nieuwe data. Soms zijn de specifiekere modellen die mensen met ASS vormen wel aan de orde, terwijl het neurotypische verwerkingsprofiel te veel informatie als ruis wegzet (bv. het detecteren van spellingsfouten in teksten of “bugs” in computerprogramma’s). Beter detecteren en leren van patronen in ASS is dus mogelijk, hoewel het gepaard gaat met meer “valse alarmen”: Men verwacht een patroon waar er geen is.

We begonnen dit artikel met verwijzingen naar studies die een verhoogde onzekerheidsintolerantie —een emotionele overreactie op onzekerheid— in ASS rapporteerden. Maar is de emotionele reactie inderdaad disproportioneel, of blijven zij eerder zitten met disproportioneel veel onoplosbare onzekerheid (omwille van een

beperking in hun mentale modellen)? De HIPPEA theorie suggereert toch vooral dat dit laatste het geval is. Een neurotypisch persoon zou even emotioneel kunnen reageren als hij of zij met dit niveau van onopgeloste onzekerheid geconfronteerd wordt. Dit verdient echter meer experimenteel onderzoek waarin we onzekerheid rigoureus manipuleren en nagaan welke modellen worden geleerd in ASS in vergelijking met de neurotypische populatie. Met dit onderzoek kunnen we de emotionele en gedragsmatige reacties op voorspellingsfouten grondig onderzoeken en nagaan hoe mensen daar al dan niet verschillend mee omgaan.

Literatuur

Alink, A., Schwiedrzik, C. M., Kohler, A., Singer, W., & Muckli, L. (2010). Stimulus Predictability

Reduces Responses in Primary Visual Cortex. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 30(8), 2960–2966.

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3730-10.2010>

Bach, D. R., & Dolan, R. J. (2012). Knowing how much you don't know: a neural organization of uncertainty estimates. *Nature Reviews. Neuroscience*, 13(8), 572–586.

<https://doi.org/10.1038/nrn3289>

Baron-Cohen, S., Leslie, A. M., & Frith, U. (1985). Does the autistic child have a “theory of mind” ? *Cognition*, 21(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(85\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0010-0277(85)90022-8)

Blakemore, S. J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D. (1998). Central cancellation of self-produced tickle sensation. *Nature Neuroscience*, 1(7), 635–640. <https://doi.org/10.1038/2870>

Boulter, C., Freeston, M., South, M., & Rodgers, J. (2014). Intolerance of uncertainty as a framework for understanding anxiety in children and adolescents with autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 44(6), 1391–1402.

<https://doi.org/10.1007/s10803-013-2001-x>

Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive

science. *The Behavioral and Brain Sciences*, 36(03), 181–204.

<https://doi.org/10.1017/S0140525X12000477>

Egner, T., Monti, J. M., & Summerfield, C. (2010). Expectation and Surprise Determine Neural Population Responses in the Ventral Visual Stream. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 30(49), 16601–16608.

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2770-10.2010>

Egner, T., & Summerfield, C. (2013). Grounding predictive coding models in empirical neuroscience research. *The Behavioral and Brain Sciences*, 36(03), 210–211.

<https://doi.org/10.1017/S0140525X1200218X>

Frith, U., & Happé, F. (1994). Autism: beyond “theory of mind.” *Cognition*, 50(1–3), 115–132.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)90024-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)90024-8)

Hill, E. L. (2004). Executive dysfunction in autism. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(1), 26–32.

<https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.11.003>

Kanner, L. (1943). Autistic disturbances of affective contact. *The Nervous Child*, 2, 217–250.

Koenderink, J. (2015). Gestalts as ecological templates. In J. Wagemans (Ed.), *The Oxford Handbook of Perceptual Organization*. Oxford: Oxford University Press.

Kok, P., & de Lange, F. P. (2014). Shape perception simultaneously up- and downregulates neural activity in the primary visual cortex. *Current Biology*, 24(13), 1531–1535.

<https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.05.042>

Lee, T. S., & Mumford, D. (2003). Hierarchical Bayesian inference in the visual cortex. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 20(7), 1434–1448.

<https://doi.org/10.1364/JOSAA.20.001434>

Neil, L., Olsson, N. C., & Pellicano, E. (2016). The Relationship Between Intolerance of Uncertainty, Sensory Sensitivities, and Anxiety in Autistic and Typically Developing Children. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46(6), 1962–1973.

<https://doi.org/10.1007/s10803-016-2721-9>

- Newman, J. (2014). To Siri, with love: How one boy with autism became BFF with Apple's Siri. *New York Times*. Retrieved October, 14, 2014.
- O'Gorman, G. (1967). *The Nature of Childhood Autism*. London: Butterworth.
- Rao, R. P. N., & Ballard, D. H. (1997). Dynamic Model of Visual Recognition Predicts Neural Response Properties in the Visual Cortex. *Neural Computation*, 9(4), 721–763.
<https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.4.721>
- Rayner, K., White, S. J., Johnson, R. L., & Liversedge, S. P. (2006). Reading words with jumbled letters: there is a cost. *Psychological Science*, 17(3), 192–193.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01684.x>
- Robertson, A. E., & Simmons, D. R. (2015). The sensory experiences of adults with autism spectrum disorder: A qualitative analysis. *Perception*, 44(5), 569–586.
<https://doi.org/10.1068/p7833>
- Van de Cruys, S., de-Wit, L., Evers, K., Boets, B., & Wagemans, J. (2013). Weak priors versus overfitting of predictions in autism: Reply to Pellicano and Burr (TICS, 2012). *i-Perception*, 4(2), 95–97. <https://doi.org/10.1068/i0580ic>
- Van de 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 de Cruys, S., Van der Hallen, R., & Wagemans, J. (2017). Disentangling signal and noise in autism spectrum disorder. *Brain and Cognition*, 112, 78–83.
<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2016.08.004>
- Van der Hallen, R., Evers, K., Brewaeys, K., Van den Noortgate, W., & Wagemans, J. (2015). Global processing takes time: A meta-analysis on local-global visual processing in ASD. *Psychological Bulletin*, 141(3), 549–573. <https://doi.org/10.1037/bul0000004>
- Vermeulen, P. (2009). *Autisme als contextblindheid*. Epo.
- Wacongne, C., Labyt, E., Wassenhove, V. van, Bekinschtein, T., Naccache, L., & Dehaene, S.

(2011). Evidence for a hierarchy of predictions and prediction errors in human cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(51), 20754–20759. <https://doi.org/10.1073/pnas.1117807108>

Wigham, S., Rodgers, J., South, M., McConachie, H., & Freeston, M. (2015). The interplay between sensory processing abnormalities, intolerance of uncertainty, anxiety and restricted and repetitive behaviours in autism spectrum disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 45(4), 943–952. <https://doi.org/10.1007/s10803-014-2248-x>

Zaidel, A., Goin-Kochel, R. P., & Angelaki, D. E. (2015). Self-motion perception in autism is compromised by visual noise but integrated optimally across multiple senses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(20), 6461–6466. <https://doi.org/10.1073/pnas.1506582112>