

孤独症者的预测编码缺陷： 前馈联结异常还是反馈联结异常？^{*}

荆伟¹ 陈琦¹ 薛云卿¹ 杨苗² 张婕²

(¹陕西师范大学教育学部, 西安 710062) (²西安市儿童医院, 西安 710002)

摘要 依据预测编码理论, 研究者提出预测缺陷是孤独症谱系障碍(Autism Spectrum Disorder, ASD)个体感知运动、认知学习和社交言语等多领域缺陷的基础, 即孤独症的预测缺陷假说(Predictive Impairment in Autism, PIA)。在PIA中, 研究者基于贝叶斯和层级性推理分别提出“低先验”和“高且不灵活的预测误差精度”两个假说, 然而上述假说并未得到一致证据支持。ASD个体在不同领域中不同先验的相对权重并非普遍降低, 而是具有广泛的任务或情境敏感性。关于ASD个体是否具备基于环境波动调节预测误差精度的能力, 也尚存分歧。此外, 关于其潜在机制, 是神经调节系统异常导致的自下而上前馈联结异常, 还是预测脑区功能异常导致的自上而下反馈联结异常, 尚无定论。由此可见, 虽然该理论为ASD提供了统一的解释框架, 但仍需更多研究证据进行修正和完善, 以期对早期筛查和诊断、治疗和教育实践提供指导。

关键词 孤独症谱系障碍, 预测编码, 先验信念, 感官输入, 前馈/反馈联结

分类号 B845

1 引言

预测是个体适应环境的核心机制, 是大脑的基本功能(Heeger, 2017)。预测编码理论(Predictive Coding Theories, PCT)是解释该功能的重要理论家族, 为解释大脑如何不断地依据先验信念对感官输入进行预测提供框架(Teufel & Fletcher, 2020)。个体的行为、知觉、情感、注意和学习等都受大脑预测系统的深刻影响(Cannon et al., 2021)。该理论家族源于健康个体大脑功能研究, 随后用于理解各类精神疾病的神经过程(Barrett et al., 2016; Sterzer et al., 2018)。近年, 学者们亦将之应用于解释ASD个体的感知运动、认知学习和社交言语等多领域缺陷(Lawson et al., 2014; Pellicano & Burr, 2012; Rosenberg et al., 2015; van de Cruys et al., 2014), 即预测缺陷假说(PIA)。该

理论假说提出ASD个体的认知功能障碍可能源于缺乏建立和更新内部模型对未来事件预测的能力(Pellicano & Burr, 2012; van de Cruys et al., 2014)。由于PCT由贝叶斯、层级性以及主动性三个推理模型组成, 因而在PIA内部不同的研究者从不同推理模型提出不同假说。Pellicano和Burr(2012)依据贝叶斯推理模型提出“低先验”假说(Hypo-priors), 认为ASD个体的预测缺陷表现为先验信念相对权重降低, 感知更受感官输入支配。而van de Cruys等(2014)从环境波动性角度依据层级性推理模型提出, 该群体不能依据环境波动性灵活调节预测误差精度, 即“高且不灵活的预测误差精度”假说(High and Inflexible Precision of Prediction Errors in Autism, HIPPEA)。该假说之所以引起广泛关注, 是因为它有可能将ASD个体的多领域缺陷与其社交障碍和刻板行为两大核心症状整合在统一的理论框架中进行更深层的机制解释, 从而开发更好的治疗方法, 更完善的诊断标准和工具(Constant et al., 2020; Haker et al., 2016), 还有可能将ASD与预测神经科学联系起来, 对ASD神经生物学差异提供新的理解, 并激

收稿日期: 2023-07-22

^{*} 2023年度国家社会科学基金教育学一般项目(项目编号: BBA230067)资助。

通信作者: 荆伟, E-mail: ling_zero@126.com

张婕, E-mail: 86853513@qq.com

发神经活性药物新靶点的探索(Haker et al., 2016)。虽然该理论为 ASD 提供了可信统一的解释模型,但相关假说并未得到实验证据的一致支持。此外,关于其潜在机制,到底是源于神经调节系统异常导致的自下而上前馈联结异常,还是源于预测脑区功能异常导致的自上而下反馈联结异常,目前尚无定论。鉴于此,本文将在理论概述的基础上,系统梳理感知运动、认知学习和社交言语三个领域中“低先验”和“HIPPEA”两种假说的支持与反对证据,随后阐释前馈联结异常和反馈联结异常如何可能导致 ASD 个体的预测缺陷,以期明确未来研究方向。

2 预测编码理论概述

PCT 是解释大脑预测功能的理论家族。该理论家族由贝叶斯、层级性以及主动性三个推理模型组成。其中,贝叶斯推理解释个体对环境感知的预测机制,层级性推理解释个体基于环境波动性的预测误差精度调节机制,主动性推理是大脑预测系统最小化预测误差的途径之一。

2.1 贝叶斯推理(Bayesian Inference)

贝叶斯推理将大脑视为基于感觉输入生成外界环境的内部预测模型的推理机器。该模型为感官输入与不同时间尺度内先验信念整合形成知觉的过程提供框架。知觉可以理解为由感官输入不断更新的后验信念。如图 1 所示,曲线宽度表示不确定性(方差);它的倒数(曲线窄度)表示精度。后验信念表示更新的信念,作为先验信念(知识、期望或预测)和似然概率(观测数据,如感官输入)之间的精度加权折衷,它由精度更高的一方主导。根据贝叶斯推理公式,感知预测(D_p)是先验信念(D_{prior})与感官输入($D_{sensory}$)的最优加权整合

(公式 1)。其中 w 是感官输入的相对权重。同样的整合也可表示为基于感官输入与先验信念之间的预测误差($D_{sensory} - D_{prior}$)进行更新的后验信念($D_{posterior}$) (公式 2) (Shi et al., 2022)。因此, w 也可视为预测误差的相对权重,即预测误差精度,被 van de Cruys 等(2014)定义为学习速率(learning rates)。

2.2 层级性推理(Hierarchical Inference)

贝叶斯推理虽然能够解释个体对环境感知的预测机制,但环境是变化的,需要大脑进行适应性的动态前馈和反馈,即内部模型的动态更新来适应环境(Chan et al., 2016)。因而,层级性推理将大脑看作不同加工水平组成的层级系统,每个水平都接收自下而上的感官输入和自上而下的先验信念。当二者信息不一致时,就会产生预测误差。只有足够强的预测误差信号会向上传递,在更高水平上调整先验信念,从而在低水平上产生新的预期,最终减少下级预测误差,形成较为准确的感知。层级性推理由精度调节机制实现,即大脑根据环境灵活调节预测误差权重,也即灵活调节每个层级产生的预测误差对更高层级先验信念的影响程度(van de Cruys et al., 2014)。预测误差权重(w)等于感官输入精度($\pi_{likelihood}$)与先验信念精度($\pi_{posterior}$)之间的比值。由于感官输入随环境变化而变化,因而大脑需要根据环境变化对感官信息进行精度估计从而有效调节学习速率以更好地预测外部世界。当环境嘈杂充满噪音时,感官信息精度降低,预测误差的权重降低即学习速率降低,预测更依赖于先验信念;反之亦然(Palmer et al., 2017)。

2.3 主动性推理(Active Inference)

大脑预测系统旨在最小化预测误差从而更好

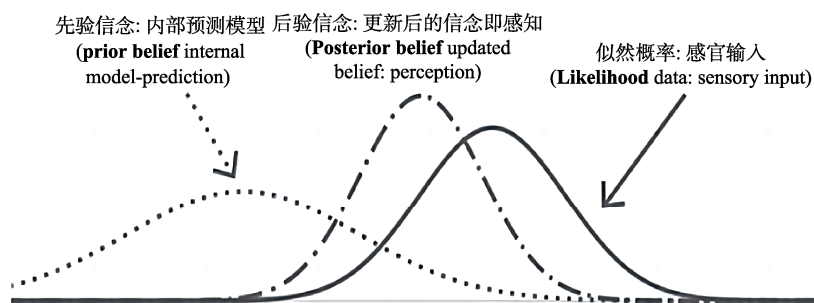


图 1 贝叶斯推理(引自 Haker et al., 2016)

$$D_p = (1 - w)D_{prior} + wD_{sensory} \text{ (公式 1)}$$

$$D_{posterior} = D_{prior} + w(D_{sensory} - D_{prior}) \text{ (公式 2)}$$

地预测外部世界。最小化预测误差的途径是知觉性推理和主动性推理。当预测误差产生(图 2A)时,主动性推理采取行动改变感官输入减少预测误差(图 2B),而知觉性推理更新内部预测模型来减小预测误差(图 2C) (Palmer et al., 2017)。为了实现先验期望需要知觉性和主动性推理共同完成,而二者之间的平衡依赖于环境敏感度的调整,通过层级性推理的精度调节机制实现(图 2D)。具体而言,由于环境波动性①和感觉通道噪声②,预测误差不可避免。依据预测误差精度调节机制,若环境嘈杂,个体将降低预测误差精度,那么会有更多预测误差被推测为环境噪音③而被忽略,更少预测误差被视为需要学习的规律④传递到更高层次的内部模型⑤进行编码,反之亦然(Haker et al., 2016)。该过程涉及多个感官系统的协调合作,在大脑各个皮层进行精度估计,产生最优整合途径,

以此最小化预测误差,从而实现先验预期。

3 “低先验”理论假说——先验信念的相对权重降低

虽然“低先验”假说最初关注低水平的感知运动领域,但这种感官输入与先验信念之间的权重异常还将导致 ASD 个体在高水平的认知学习和社交言语领域表现出障碍(David et al., 2009)。不同领域自上而下的预测控制模型基于不同的先验类型。感知运动领域基于来自近期感知觉经验的感知先验。认知学习领域基于在实验情境中通过连续暴露学习获得的统计规律,称之为经验先验。与前两者为领域一般性先验不同,社交言语领域特有的系统先验是指在以往社会经历中学习到的也可能有一定先天成分的领域特殊性先验(Cannon et al., 2021)。

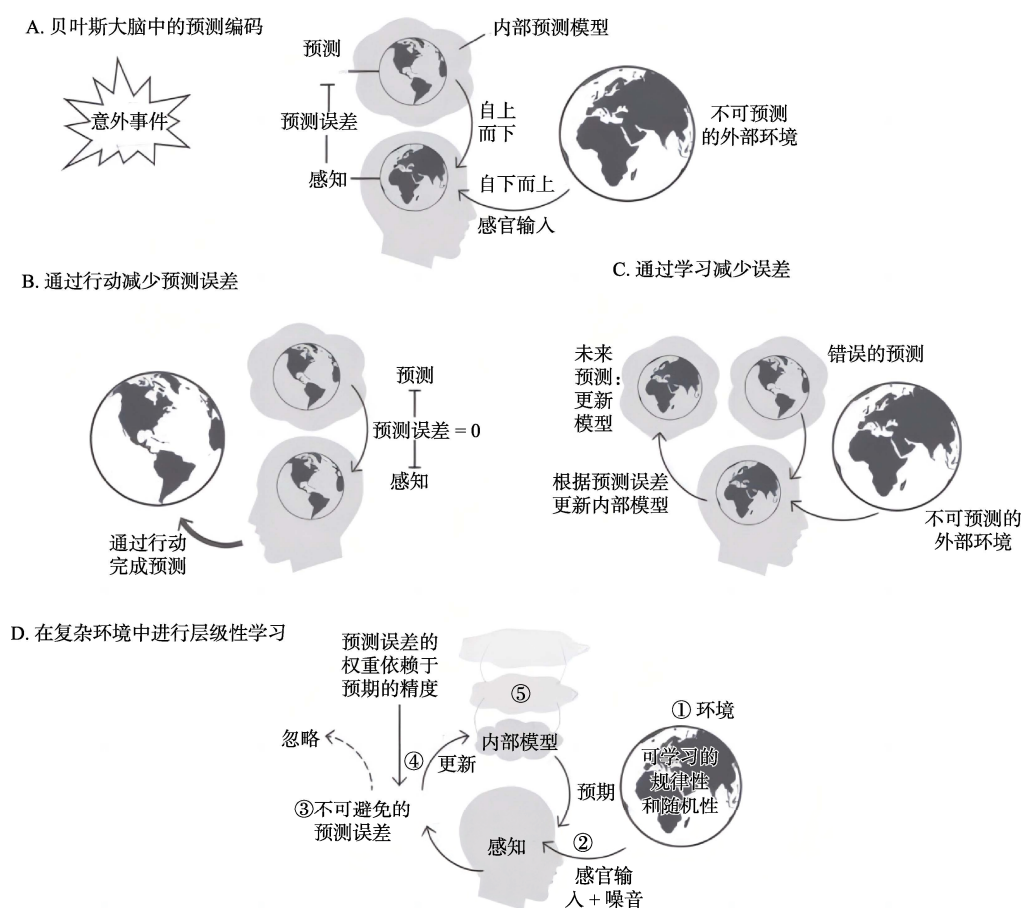


图2 大脑的预测编码模型(引自 Haker et al., 2016)

3.1 感知运动领域的预测编码缺陷——基于感知先验的预测

ASD 个体存在异常感知觉, 包括感觉超敏性和低敏性(Crane et al., 2009), 以及异常感官寻求, 如对光和色彩明亮物体的迷恋(Ben-Sasson et al., 2009)。此感官上的非典型性已被纳入诊断标准(American Psychiatric Association & Association, 2013)。依据“低先验”假说, ASD 个体感知异常源于自上而下先验信念和自下而上感官数据的权重异常。先验权重降低导致 ASD 个体在感知运动领域表现出感知觉适应性降低和感知运动预测缺陷。

3.1.1 感知觉适应性降低

适应(Adaptation)是指近期感知觉经验驱动神经元反应特性发生变化的一种神经调节过程(Pellicano & Burr, 2012)。近期接触的刺激会使后继刺激的感知产生偏差, 也即当前感知受先前感知觉经验的密切影响(Turi et al., 2015)。当同一刺激重复出现时, 大脑神经反应减弱, 此现象称为神经习惯化(Neural Habituation)或重复抑制(Repetition Suppression), 是大脑神经系统的一种适应性属性。因而, 习惯化可视为适应的一种特殊形式(Cannon et al., 2021)。依据贝叶斯推理, 适应反映了自上而下(基于预测)和自下而上(基于刺激)输入之间的匹配, 反映了感官和先验之间误差的减少(Friston, 2005)。那么适应减弱反映个体获得或使用先验不足(Pellicano & Burr, 2012)。

研究证实 ASD 个体普遍存在适应减弱。关于社会刺激, 研究者观察到, ASD 儿童(Ewing et al., 2013)在面孔识别中, ASD 儿童(Pellicano et al., 2013)和成人(Lawson et al., 2018)在视线方向判断中, 以及 ASD 儿童(Rhodes et al., 2018)和成人(Rutherford et al., 2012)在表情识别中均存在适应减弱。还有研究者发现 ASD 青年在更高级的社会刺激如生物运动动作识别中的适应减弱(van Boxtel et al., 2016)。关于非社会刺激, 研究者们也一致观察到, ASD 儿童对刺激数量的适应减弱(Turi et al., 2015); 在听觉通道, ASD 成人对声音响度的适应减弱(Lawson et al., 2015); 在视觉通道, ASD 幼儿对重复出现的形状注视时间更长(Vivanti et al., 2018); 在触觉通道, ASD 儿童也表现出适应减弱(Puts et al., 2014); 在多感官通道, ASD 成人在视听整合任务(Turi et al., 2016)、视听次序判断任务(Stevenson et al., 2017)和视听异步

任务(Noel et al., 2017)中均表现出适应减弱。前瞻证据表明, ASD 高危婴儿早在确诊之前就对音调(Guiraud et al., 2011)、言语(Seery et al., 2014)和辅音元音对(Righi et al., 2014)的重复抑制或习惯化减弱。此外, 神经证据显示, 相对于对照组, ASD 成人对重复的听觉(Font-Alaminos et al., 2020; Kolesnik et al., 2019; Ruiz-Martinez et al., 2020)和面孔(Tam et al., 2017)刺激以及 ASD 儿童对重复的听觉和视觉刺激(Jamal et al., 2020)均存在习惯化下降。

ASD 个体普遍存在的适应减弱支持“低先验”假说, 即此群体的感知较少受先验影响。这种适应减弱可能是此群体感觉超负荷的基础(Sinha et al., 2014)。然而, 也有少数研究显示 ASD 个体的适应正常。例如, ASD 成人在面孔表情和身份识别中(Cook et al., 2014), ASD 儿童在知觉因果关系判断中(Karaminis et al., 2015), ASD 青少年在生物运动速度判断中(Karaminis et al., 2020), 在视觉图片识别中(Utzerath et al., 2018), 以及 ASD 成人在颜色识别中(Maule et al., 2018)适应完好。由此可见, ASD 个体适应的非典型性似乎因刺激性质(社会性/非社会性)、加工水平(高/低)和感觉通道(听觉/视觉)不同而有所不同。目前, 已有研究引入上述变量证实 ASD 个体对听觉而非视觉刺激(Millin et al., 2018)以及对面孔而非形状(Ewbank et al., 2017)存在神经习惯化下降。先验对 ASD 个体感知的影响在不同情境中存在细微差别, 而这也恰好解释了 ASD 个体感知觉症状的异质性(Crane et al., 2009)。

3.1.2 感知运动预测缺陷

ASD 个体存在运动启动延迟(Forti et al., 2011)、姿势笨拙不稳和视觉运动协调受损(Fournier et al., 2010)等运动障碍。该障碍是 ASD 个体的“主要”特征之一, 贯穿整个生命(Gowen & Hamilton, 2013), 可能与其核心症状具有共同发育基础。已往研究者通常将之归因于粗大运动困难, 然而感知运动预测缺陷提供了另一种解释(Sinha et al., 2014)。该观点提出运动障碍可能反映大脑缺乏构建感觉反馈与运动输出的内部预测模型的能力。该模型不仅对预测自我产生的运动指令的感觉后果至关重要, 而且对理解他人运动也至关重要。此障碍可能损害互动过程中与他人的协调能力进而导致社交障碍(Landa et al., 2016)。

然而, 目前考察 ASD 个体是否存在感知运动

预测缺陷的研究结果并不一致。有证据显示 ASD 个体存在基于视觉运动学信息的预期反应缺陷。例如,高危婴儿对向自己滚来的球的预期反应降低(Landa et al., 2016);后期确诊的4至6个月的高危婴儿进食时,当勺子接近时,预期张嘴行为降低(Brisson et al., 2012),在抓取食物时,没有预期肌状舌骨激活(Cattaneo et al., 2007)。有研究进一步显示,在预测目标到达时间时,ASD 青少年在视觉线索较少的直线路径中存在异常(Sheppard et al., 2016);在与他人的协同运动中,ASD 儿童在需要依靠运动学信息预测运动的条件下存在缺陷(Fulceri et al., 2018);当 ASD 成人听到与运动相关的可预测单词和声音时,预测电位降低(Grisoni et al., 2019)。上述研究说明 ASD 个体存在基于视觉运动学信息的运动预测缺陷,支持“低先验”假说。但预测性眼球运动研究却发现,当运动物体消失在遮挡物后时,ASD 儿童(Tewolde et al., 2018)和青少年(Ego, Yüksel, et al., 2016)能够表现出对目标位置的预测性眼跳。与前述研究考察基于视觉信息的运动预期不同,另有研究运用多模态物体提升范式证实,ASD 成人能够基于物体体积(Arthur et al., 2020)或物质属性(Arthur et al., 2019)形成重量预期,进而预测和控制提升行为。这说明对于低层次的感觉运动技能,预测机制在 ASD 个体中可能未受影响。

与前述研究考察感知-运动预测不同,还有研究考察运动-感知预测。Finnemann 等(2021)运用强化和有意结合两个互补任务证实,ASD 成人表现出正常的“感知衰减效应”,即自我产生的感官结果比相同强度的外部产生的感官结果更弱(Wolpe et al., 2016),以及正常的“有意绑定效应”,即自我产生的行为与其感官结果在时间上比外部产生的运动与其感官结果更接近。但是也有研究证实 ASD 个体音调的自我启动并不会减弱听觉 N1,即感知衰减效应减弱(van Laarhoven et al., 2019)。由此可见,感知运动领域的证据并未一致支持“低先验”假说,先验在预测中的作用因预期类型(运动/重量)、先验类型(感知/运动)和反应类型(动作/眼动)存在差异。

3.2 认知学习领域的预测编码缺陷——基于经验先验的预测

典型发展(Typically Development, TD)个体通过经验累积能够内隐地学习环境中的潜在统计规

律。统计学习的结果是脑将先验信息与当前感官证据加权整合以评估未来结果的概率(Bianco et al., 2020)。这些在实验情境中通过多次暴露学习到的统计规律即经验先验,包括无前事的累积性分布概率和可变前事与结果之间的关联概率(Cannon et al., 2021)。此能力在婴儿(Kirkham et al., 2007)甚至新生儿(Bulf et al., 2011)中就已显现,是一种经验依赖的可塑性机制。然而,ASD 个体是否能够使用感官统计数据更新其内部预测模型还存在分歧(Pellicano & Burr, 2012)。在认知学习领域中,考虑到统计学习对于感官联想和多感官整合至关重要,统计学习能力对感知加工、语言习得(Teinonen et al., 2009)以及社会互动(Mitchell et al., 2014)产生广泛而深远的联级影响。

3.2.1 累积性经验先验学习能力降低

累积性经验先验是指在有明确前因的条件下,个体在多次暴露过程中学习到的先前随机刺激特征或频次的分布概率(Cannon et al., 2021)。在知觉领域,研究者使用集中倾向效应(Central Tendency Effects, CTE)反映累积性经验先验的相对权重。CTE 是指在时间、长度、大小等数量特征判断中对平均值的一种倾向性,作为一种重要的知觉调节,是大脑将先验信念纳入知觉判断的最佳策略(Sciutti et al., 2014)。因而,CTE 降低意味着知觉推理偏向感官输入,受先验影响程度较低。有证据表明,在时间间隔再现(Karaminis et al., 2016)和听觉序列辨别(Jafe-Dax & Eigsti, 2020)任务中,ASD 儿童表现出 CTE 降低。随后,Lieder 等(2019)采用双音频率辨别任务,进一步将先前经验的影响分解为来自于较近和较远试次的影响,发现 ASD 个体的 CTE 降低主要源于近期统计数据更新减少。这说明该群体的内部表征更新较慢。然而,在视觉运动预测任务中,Park 等(2021)发现尽管 ASD 组的 CTE 正常,但形成机制异常。细粒度分析显示,TD 组的 CTE 在实验过程中逐渐发展。这是 CTE 的关键特征,它反映了刺激统计数据的积累效应,是一种适应性预测行为。然而,ASD 组的 CTE 未随经验增加而增长,反而遵循早期反应主导的非典型轨迹。

此外,研究者们还通过在“奇异球”范式中引入偏差刺激概率变量考察 ASD 个体的频次概率统计学习能力。在传统的“奇异球”范式中,当偏差刺激概率较低且恒定时,ASD 个体显示正常的失

匹配负波(Mis-Match Negativity, MMN) (Knight et al., 2020)。然而,当引入偏差刺激概率变量,与TD组比较而言,ASD组的MMN较少受偏差刺激概率调节(Goris et al., 2018)。由于上述研究未澄清ASD个体的概率统计学习障碍是否受注意调节,Westerfield等(2015)采用三刺激“奇异球”范式,结合视觉目标探测任务,系统操纵目标和非目标刺激概率。研究发现,与对照组比较而言,ASD组的P3振幅对目标刺激的概率变化更敏感而对非目标刺激的概率变化反应较弱。这说明ASD个体不能自动追踪刺激概率变化,而需有意注意参与。这种隐性统计学习能力降低会影响社会性行为,因为社会情境是极其动态的且线索是隐性的。

来自行为预期的研究也证实ASD个体概率先验运用不足。例如,Schuwert等(2016)采用眼球追踪任务考察ASD儿童和成人是否能够对反复呈现的行为产生预期注视行为。该研究呈现卡通乌龟选择短路径而非长路径获得食物的视频共4次。结果发现,与TD组不同,重复试验未使ASD组产生对短路径的注视偏向。这表明ASD组从行为的频率信息中获益较少,难以利用行为的频率信息产生预期。然而,Ganglmayer等(2020)认为前述研究未澄清ASD个体的统计学习是普遍受损,还是需要更多重复经验。因而,他们采用类似的路径选择任务,呈现10个试次澄清此问题。结果发现,ASD儿童能够利用频率信息预测行为目标,只是他们统计学习的速度更慢。

3.2.2 关联性经验先验学习能力降低

人类对环境线索和结果之间的偶然关联很敏感。大脑依赖于从过去经验中学习的关联概率预测最有可能的结果。然而,ASD个体是否能够学习并利用关联概率预测行为、事件、奖励和目标尚存分歧。在行为预期中,研究者将三个有声-无声-有声拨浪鼓递给婴儿,并在1分钟时间内记录婴儿摇晃拨浪鼓的时间比值。他们发现,10个月的高危婴儿摇晃无声拨浪鼓的时间比值低于对照组。这表明高危婴儿依据近期震动经验产生行为预期的能力降低,而TD婴儿仅通过一次暴露便可创建预测模型(Northrup et al., 2017)。与Northrup等考察一次暴露中学习关联信息的行为预测能力不同,Braukmann等(2018)采用眼球追踪任务,设置实际(杯子对嘴/手机对耳朵)和替代(杯子对耳朵/手机对嘴)位置两种条件,考察婴儿是

否能够基于生活经验中学习到的物体与身体部位之间的关联信息产生预期注视行为。结果显示,两组婴儿在两种条件下对目标位置的预期眼动没有显著差异,且均对正常条件下的实际位置表现出更频繁的预期眼跳。这表明10个月的高危婴儿已经掌握此类先验信息且对其行为预期具有调节作用。上述分歧说明ASD个体的关联概率统计学习预测能力可能并不存在普遍障碍,而是取决于学习次数(暴露机会)。

前述研究考察的行为预测能力是基于直接且必要的行为/事件关联信息,另有研究考察ASD个体是否能够基于间接且非必要的行为/背景关联信息预测行为。Amoruso等(2019)设置行为(吃/喝和给予)和背景线索(即盘子和桌布的颜色)之间共同出现的概率,隐含地操纵背景先验预期,以此考察ASD成人是否能够通过多次暴露从环境中学习到行为/背景关联概率信息预测行为。结果发现,TD组行为预测的敏感性随行为/背景关联概率的增加而增加,而ASD组则不然。在此基础上,Bianco等(2020)采用相似任务,呈现几何形状,证实高孤独特质个体使用行为/背景关联概率先验产生期望区分几何形状的能力降低。此研究将ASD个体的关联概率内隐统计学习预测缺陷进一步拓展到非社会领域。为了进一步了解内隐学习的背景关联信息是否受到外显反馈信息的影响,Bianco等(2022)调整了先前的动作预测和形状预测任务,将每个任务划分为外显和内隐阶段。外显阶段提供语音反馈来强化或抑制关联概率先验,内隐阶段则与先前任务相同无语音反馈。结果显示,在社会和非社会领域中,情境反馈能提高被试在高关联概率情境中的预测成绩,而感官反馈对关联概率先验的影响较小。上述结果表明,ASD个体可能在社会性和非社会性领域都存在基于关联概率先验的行为预测缺陷,但外显反馈能强化其关联概率先验而提高预测准确性。

基于时间感知的事件预测是人类时间认知的一个重要方面,是指个体通过对环境中时间规律性的追踪,根据时间间隔长短来预测事件的发生。预测将来的事件是适应性行为的基础(Beker et al., 2021; Kunchulia et al., 2017; Kunchulia et al., 2020)。在此任务中,研究者操纵刺激响应间隔(200 ms / 800 ms)与刺激移动方向(左/右)之间的关联概率,考察被试是否能够基于时间感知的关联

概率预测事件。结果显示,ASD儿童对频繁组合的反应比对不频繁组合的反应更快,表现出更好的基于时间感知的事件预测能力(Kunchulia et al., 2017; Kunchulia et al., 2020)。这说明ASD儿童对时间的预测价值更加敏感。上述结果说明,ASD个体的关联概率统计学习预测能力可能并不存在普遍障碍,而是取决于学习线索的价值性或显著性。然而,Beker等(2021)的行为数据结果虽然也一致表明,ASD儿童表现出基于时间感知的事件预测完好无损,但是其电生理数据却显示ASD儿童对视觉线索的神经振荡显著减少。由于神经振荡是一个关键的预期机制,因而该研究结果说明该群体潜在的预期神经过程可能存在异常。

奖励预测是指个体通过反馈学习奖励概率最高的关联线索的能力。此类任务通常在熟悉阶段将被试反复暴露于前因/后果关联中并且要求被试进行有意识地学习,随后在测试阶段观察被试在预测错误发生时的神经反应。Mosner等(2019)采用功能磁共振成像技术,探究ASD个体奖励预测错误(Reward prediction errors, RPE)的神经机制。研究者向ASD和TD成人呈现提示线索(形状A/形状B)与奖励结果(100美元/普通矩形)的关联,而被试需在熟悉阶段通过按键后的反馈结果学习此关联。测试阶段则设置80%试次的关联与熟悉阶段相同(预测正确),20%试次与熟悉阶段相反(预测错误),要求被试看到提示线索后预测接下来的奖励结果并按键反应。结果显示,ASD组在RPE条件下左侧岛叶和右侧额极的激活程度比TD组更高。这表明ASD个体对奖励预测错误的神经反应是非典型的。随后,Kinard等(2020)采用同样的任务进一步探究ASD青少年对社会性和非社会性RPE的神经机制。在本研究中,研究者在熟悉阶段直接告知被试提示线索(形状A/形状B)与奖励结果(奖励图像/乱码图像)之间的关联。其中,奖励结果包含微笑面孔的社会性奖励和物品图像的非社会性奖励。结果发现,ASD组在非社会性REP条件下与TD青少年反应相似,而在社会性REP条件下前扣带皮层激活降低,反映了ASD的社会性预测错误信号传递减少。该结果表明ASD个体基于线索/奖励关联先验的学习预测缺陷可能仅限于社会性领域。

目标预测是指个体整合由下至上的感官信息与由上至下的线索/目标关联的先验信息以指导

个体对目标刺激进行预测做出选择的能力,是个体与周围世界进行有效互动的关键(Retzler et al., 2021)。Greene等(2019)采用目标预测错误范式,考察ASD个体基于社会性和非社会性的视觉关联信息的目标预测能力。学习阶段告知ASD和TD青少年两种视觉提示线索(红圆圈/蓝方块)与目标图像位置(左/右)的关联,要求被试根据关联先验预测图像的目标位置。其中,目标图像包含社会性的面孔图像和非社会性的物品图像。测试阶段设置80%试次中线索/结果关联与先验一致(预测正确),20%试次与先验不一致(预测错误)。研究发现,与TD组比较而言,在社会性和非社会性预测错误期间,ASD组均更少注视线索预测位置。这说明相较于线索/结果关联先验,ASD个体更重视感官输入且不仅限于社会性领域。与前述研究设置单一线索与单一目标直接关联不同,Ong和Liu(2023)设置外显和内隐两项任务,考察了高孤独症特质的个体从多重线索中推断和学习有效预测线索的能力。熟悉阶段向被试呈现语言A和语言B的4种语音操作(音调上升/音调下降/节奏加快/节奏减慢)与4个物品的关联。外显任务告知被试需根据按键反应的反馈结果学习其中的关联,而内隐任务要求被试计算语音的音节数与物品的顺序数。结果显示,所有被试都能习得语音操作与物品的关联且外显任务的成绩高于内隐任务。这说明孤独症特质对个体从多重线索中推断学习有效线索预测目标的能力没有影响。

3.3 社交言语领域的预测编码缺陷——基于系统先验的预测

社交情境中社会行为具有高度的内在不确定性。这就要求个体能够借助“社会特异性”的系统先验,降低社会行为的内在不确定性,进而与他人进行有效的社会互动(Sinha et al., 2014)。然而,ASD个体可能由于先天成分受损或在社会经历中习得此类社会性系统先验的能力减弱,因而在社交情境中不能有效降低社会行为的内在不确定性,进而导致社交障碍。

3.3.1 内隐社会性系统先验权重降低

近年来,已有研究证实ASD个体内隐社会性先验的使用能力减弱。例如,当模特伸手去拿的目标物体发生位置变化且缺乏运动学感官证据时,ASD幼儿对目标物体的原来位置而非新位置上的目标物体进行了预期扫视。这表明ASD幼儿倾向

于基于运动学信息所传递的感知觉先验而不是基于心理状态的社会性先验去预测行为(Krogh-Jespersen et al., 2018)。当运动学信息所传递的感官证据越来越少时, ASD 成人能够基于行为发生的概率性经验先验预测他人行为, 但却不能基于作为社会性系统先验的“以牙还牙”的社交策略去预测他人行为(Chambon et al., 2017)。在人际预测方面, 在生物运动掩蔽探测任务中, TD 个体在“交际”条件下对行动者的视觉辨别能力比在“个体”条件下更强, 而 ASD 个体无此“人际预测编码”现象(von der Luhe et al., 2016)。在情绪知觉方面, TD 个体存在“超调”效应, 即由快乐向中性不断变化的中性面孔更容易被知觉为轻微愤怒, 而由愤怒向中性不断变化的中性面孔更容易被知觉为轻微快乐。该效应反映了“情绪预期”对知觉的影响, 即近期的知觉历史对他人情绪状态非自愿的自动预期对中性面孔产生了知觉偏差。然而, Palumbo 等(2015)证实, ASD 成人的“超调”效应在面孔身份变换条件下依然存在, 而 TD 成人则消失。这说明 ASD 个体的“超调”效应是由基本的刺激对比度而非社会性先验驱动。

3.3.2 外显社会性系统先验权重正常

与上述研究证实 ASD 个体内隐社会性先验的使用能力减弱不同, Hudson 等(2021)证实, 明确的意图陈述能够使 ASD 和 TD 个体产生相似的知觉偏差。这说明 ASD 个体的感知受到外显社会性先验由上至下的影响作用。这个发现挑战了“低先验”假说。ASD 个体的社会性先验使用能力可能只是缺乏自发性, 而不是缺失。此外, 语言作为个体在社会经历中习得的一套符号系统也可视为社交领域内特定的外显社会性系统先验, 因而来自于语言预测领域的研究证据同样挑战了“低先验”假说。例如, 3~4 岁 ASD 幼儿能够使用动词的语义信息来预测即将到来的名词(Prescott et al., 2022), 5 岁的 ASD 幼儿与 TD 同龄人一样, 在实时句子理解过程中表现出基于动词的前瞻性眼球运动(Zhou et al., 2019), 当 ASD 成人看到的图像与听到的句子语义不同时也会产生更大的神经反应信号(Barzy et al., 2020)。

4 “HIPPEA”理论假说——反应性精度调节能力下降

由前述研究可见, ASD 个体在不同领域中不

同先验的相对权重并非普遍降低(Tewolde et al., 2018), 而是具有广泛的任务或情境敏感性(Palmer et al., 2017)。由此可见, “低先验”假说并未得到研究证据的一致支持(Angeletos & Series, 2023)。这可能是由于贝叶斯推理模型未能考虑到环境的多变性。层级性推理模型指出, 大脑需要根据环境变化灵活决定何时提高预测误差精度将更多预测误差视为可学习的环境波动, 何时降低预测误差精度将更多的预测误差视为可忽略的环境噪音(Sarafyazd & Jazayeri, 2019)。基于层级性推理提出的“HIPPEA”假说认为, ASD 个体不是不能够从过去经验中学习形成内部表征, 而是不能依据环境变化灵活调节预测误差精度也即学习速率, 灵活决定何时学何时不学(Lawson et al., 2014; Palmer et al., 2017; van de Cruys et al., 2014)。他们通常高估环境波动, 赋予预测误差更高权重, 保持较高的学习速率, 倾向于将更多可能是环境噪音导致的预测误差视为可学习的信息。这种学习模式将导致 ASD 个体在简单稳定环境中生成偏向于感官输入的对特定情境“过度拟合”的预测模型, 而在复杂多变的环境中产生感官超载而无法生成预测模型(van Laarhoven et al., 2020)。

已有研究证据证实 ASD 个体在稳定环境中表现良好, 而在波动环境下存在缺陷。例如, 在感知运动领域中, Arthur 等(2021)在虚拟现实场景中向 ASD 和 TD 成人呈现网球发球后落在指定位置并反弹的轨迹, 隐含操纵网球弹性变化信息及其出现位置概率, 要求被试击中反弹的网球。结果发现, 在稳定阶段两组击中率无显著差异, 而在波动阶段 ASD 组的击中率显著低于 TD 组, 且表现出缓慢的类似新手的运动学特征。Arthur 等(2022)采用相同的实验范式, 进一步证实 TD 组在有提示条件下比无提示条件下注视反弹定点的高度更高, 而 ASD 组在两种条件下行为和眼跳数据无显著差异。这表明, 无论是否提供明确的情境信息, ASD 个体在波动环境中都存在感知运动预测缺陷。在认知学习领域中, Robic 等(2015)采用奖励预测任务, 呈现箭头和眼神注视两类提示线索, 设置线索有效性为 80%和 60%的两个稳定条件以及有效性在 80%和 20%之间转换的波动条件, 要求被试在两个不同颜色的盒子中按键选择一个隐含奖励分数的盒子以获得尽可能多的分数。结果显示, 在测试阶段, 社会性线索的不稳定条件

下 ASD 组达到 60%成功标准的人数显著低于 TD 组,而非社会性任务和稳定条件下则不然。Sevgi 等(2019)同样在奖励预测任务中发现,在稳定和波动环境中,高孤独特质成人对社会线索的概率学习能力降低,但在波动环境中与对照组的差异更大。那么,为何 ASD 个体在波动环境中更容易表现出预测缺陷呢?“HIPPEA”假说认为 ASD 个体基于环境变化灵活调节学习速率或预测误差精度的能力不足。

4.1 基于环境变化学习速率调节能力下降

学习速率是指个体对过去事件的整合率,用以预测未来结果(Lawson et al., 2017)。为了验证“HIPPEA”假说,研究者们运用基于强化学习的高水平决策任务考察了 ASD 个体基于环境变化灵活调节学习速率的能力。Manning 等(2017)采用奖励预测任务,向 ASD 和 TD 儿童呈现两种颜色旗帜(蓝/绿)和奖励宝箱(奖励/非奖励)的关联,设置奖励概率固定的稳定条件和交替变化的波动条件,要求被试按键选择绿色或蓝色宝箱以获得奖励。结果显示,相对于稳定条件,ASD 组和 TD 组在波动条件下的学习速率均显著提高且没有组间差异。这说明 ASD 儿童与 TD 儿童一样能够在波动条件下更新学习速率。鉴于上述研究仅比较了稳定和波动条件下的学习速率,Goris 等(2020)采用相似的奖励预测任务,设置低噪音稳定、高噪音稳定和波动三种条件,直接比较波动和噪音条件下的学习速率,考察 ASD 个体是否能够区分环境波动和环境噪音。结果显示,高孤独特质成人的学习速率与对照组一样,随环境噪音和波动水平的升高而提高,且在不同条件下并未表现得比对照组更高。这表明在动荡嘈杂的环境中高孤独特质成人更新学习速率的能力并未受损。由此可见,前述两个研究结果并未支持“HIPPEA”假说。不过,Crawley 等(2020)采用相似的奖励预测任务,设置概率习得和逆转两个条件,进一步考察不同年龄段的 ASD 和 TD 个体在波动环境中预测能力是否存在差异。结果显示,ASD 儿童和成人组与对照组相比表现出更高的学习速率。该结果与“HIPPEA”假说一致,即不同发展阶段的 ASD 个体灵活调整反应机制存在障碍,表现为对反馈的“过度学习”,也即存在噪声忽视困难。产生分歧的原因可能是,前两项研究均是由稳定环境进入到波动环境,而后一项研究采用的概率逆转任务是

由一种波动环境进入到另一种波动环境,对个体的适应能力要求更高。

考虑到是否要忽视一个意外结果还是认真对待它,取决于个体估计环境变化的准确性,因而另有研究采用低水平的线索/结果关联概率学习任务,运用层级性贝叶斯推理模型计算不同层级水平的学习速率。Lawson 等(2017)采用线索/结果概论关联学习任务,向 ASD 成人呈现高(0.84)、低(0.16)和无(0.5)三个预测水平的音调线索(高/低)与图像结果(面孔/房屋)之间的关联概率,并设置关联概率保持不变的稳定阶段和三次转换的波动阶段。结果显示,ASD 组在波动阶段更新关联概率的二级学习速率 α_2 显著低于 TD 组,而 ASD 组更新环境变化的三级学习速率 α_3 则显著高于 TD 组。这说明 ASD 个体高估环境波动性进而导致难以学习变化的关联概率信息,与“HIPPEA”假说一致。然而,Sapey-Triomphe 等(2022)认为在上述研究的任务中,选择反应与声调线索无关可能导致 ASD 组并未学习到声音与图像之间的关联。因而他们采用声调线索和点对旋转方向之间关联的学习任务明确要求被试听到声调线索之后进行预测反应。结果显示 ASD 成人的 α_2 和 α_3 与对照组均无差异,与“HIPPEA”假说不一致。 α_3 存在分歧的原因可能是,前者的实验任务是由稳定环境进入波动环境。这种学习环境的简单变化不需要 TD 个体大幅提高学习速率,而 ASD 个体却高估学习环境变化保持较高的学习速率,因而两组产生差异。而后者的实验任务是一个要求被试在多个波动环境中进行多次随机转换的概率逆转任务。这种学习环境的复杂变化对于 TD 个体而言也需要大幅度提高学习速率,因而两组未产生差异。 α_2 存在分歧的原因可能是,Lawson 等(2017)呈现的线索/结果关联概率高于 Sapey-Triomphe 等(2022)(84% vs. 62.5%)。对 TD 个体而言,前者比后者能够导致更精确的关联概率先验,产生更多的预测误差,需要更高的学习速率。而 ASD 个体,在两者中习得的关联概率先验精度都较低,学习速率都较低。因而,在 Lawson 等人(2017)的研究中两组被试之间产生了差异,在 Sapey-Triomphe 等人(2022)的研究中两组被试之间无差异。

4.2 基于环境变化误差精度调节能力下降

另有研究通过直接测量 ASD 个体在波动环境中预测误差神经信号进一步验证“HIPPEA”假

说。例如, Thillay 等(2016)记录 ASD 成人在固定顺序可预测和随机顺序不可预测序列中检测目标刺激的神经信号。结果显示, 与对照组相比, 在随机序列中, ASD 组产生更大的偶然负变异(Contingent Negative Variation, CNV)。由于 CNV 振幅反映准备机制(Bidet-Caulet et al., 2012), 这说明在随机序列中 ASD 个体具有更高的预测误差精度, 就好像他们仍在寻找可学习的规律一样; 而 TD 个体则有所降低——他们感觉到没有可学习的规律。此外, van Laarhoven 等(2020)测量被试观察拍手视频中意外无声时的大脑活动。结果显示, 与对照组相比, ASD 成人对意外的听觉遗漏产生了更大的 α 1 振幅。考虑到 α 1 振幅受预测精度调节(Arnal et al., 2011), 该结果表明 ASD 个体预测误差过于精确, 导致其在响应意外变化时产生更大的预测错误信号。Goris 等(2018)进一步引入局部偏差序列频率变量, 考察 ASD 成人预测误差精度是否受环境波动性的影响。结果显示, 虽然两组都表现出情境依赖的 MMN 振幅调制, 即与高频偏差相比, 低频偏差的 MMN 振幅更大, 但这种调制在 ASD 组中不明显。这说明, ASD 个体基于环境波动灵活调节预测误差精度的能力不足。

由于预测误差精度是感官精度和先验精度的函数, 不灵活的预测误差精度意味着不灵活的先验精度。因而, Sapey-Triomphe, Temmerman 等(2021)让 ASD 和 TD 成人参加一个旨在诱发时序效应(Time-Order Effect, TOE)的视觉辨别任务。TOE 反映先验对于感知的影响。由于先呈现的刺激相较于后呈现的刺激更容易受集中倾向效应的影响, 因而个体对先后呈现的两个刺激进行大小比较时, 如果先出现的刺激相较于后出现的刺激

更接近均值, 则二者更易分辨, 反之更不易分辨。该效应受到刺激大小分布宽度(精度)的影响: 在刺激变异较小(精度高)时, 先验影响更大; 在刺激变异大(精度低)时, 先验影响减弱。结果发现, 相较于宽条件, 对照组在窄条件下具有更明显的 TOE, 而 ASD 组无此差异。这表明 ASD 个体不能像 TD 个体那样灵活调节先验精度。此外, Shi 等(2022)采用持续时间再现任务, 以集中倾向效应为指标, 考察先验信念权重是否受环境波动顺序影响。结果显示, 只有当环境从可预测(低波动有规律可循)转变为不可预测(高波动无规律可循)时, ASD 成人才较少运用先验; 反之则不然。这说明, 只有当环境从稳定状态切换到不稳定状态时, ASD 个体才表现出预测误差的不灵活加权。

5 ASD 个体预测编码缺陷的潜在机制

由于预测误差精度是感官输入精度和先验信念精度之比的函数, 那么自下而上的感官输入精度过高(如图3所示)(Brock, 2012)或自上而下的先验信念精度过低(如图4所示)都将导致感知(后验)偏向于感官数据(Friston et al., 2013; Pellicano & Burr, 2012)。自下而上的感官输入基于到达皮层颗粒层沿皮层层次向上发展的前馈联结。自上而下的先验信念基于进入皮层颗粒层上层沿皮层层次向下或平行发展的反馈联结(Khan et al., 2015)。关于 ASD 个体预测编码缺陷的潜在机制, 存在着自下而上刺激驱动的前馈联结异常和自上而下认知驱动的反馈联结异常之间的争论。

5.1 由下至上的前馈联结异常——感官输入精度过高

在预测编码模型中, 预测误差精度由浅表锥

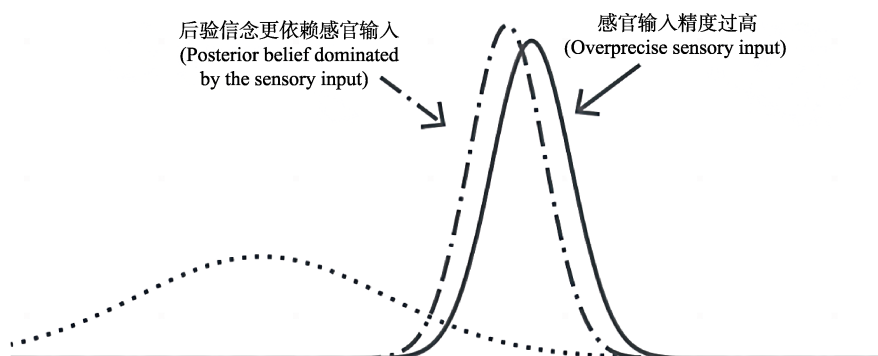


图3 感官输入精度过高(引自 Haker et al., 2016)

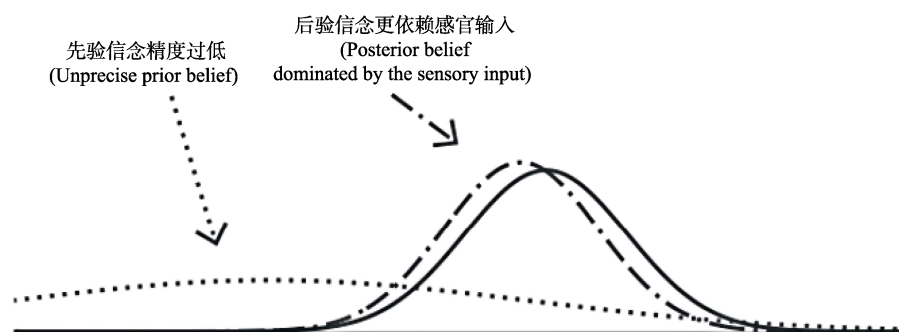


图4 先验信念精度过低(引自 Haker et al., 2016)

体细胞的突触后增益编码(Shipp et al., 2013)。突触后增益控制突触前输入对突触后输出的影响,决定预测误差对预测编码的影响程度。突触后增益的关键决定因素是神经递质的调节作用,包括谷氨酸、乙酰胆碱和多巴胺。上述神经递质的异常浓度或信号传递导致 ASD 个体对环境的异常反应,错误推断感官输入原因,不能降低感官输入精度,使预测误差精度过高,导致低先验高感官的异常权重(Friston et al., 2013)。下文将简要回顾 ASD 个体神经调节系统异常的证据及其如何与 ASD 个体的异常精度加权相关。

5.1.1 谷氨酸神经递质系统异常

ASD 成人的谷氨酸神经递质系统存在异常,表现为皮下谷氨酸减少,且与社交障碍呈负相关(Horder et al., 2014)。NMDA 谷氨酸受体被假设在增益控制和环境调节中发挥作用(Friston, 2005)。因此,ASD 个体谷氨酸病理与环境不敏感的感觉驱动和精度优化的功能失效一致。感官输入精度过高的一种可能机制是感官衰减的失败,这就意味着对感觉驱动的自上而下的影响减少。NMDA 功能低下的成年 NR1 转基因小鼠表现出 ASD 症状。该动物模型提供了低谷氨酸能病理与自下至上的感官输入信号的精确性门控之间的初步联系。最新一项神经化学证据证实,ASD 成人在右侧额下回中谷氨酸过量可能与其次优预测机制有关(Sapey-Triomphe, Timmermans, & Wagemans, 2021)。

5.1.2 乙酰胆碱神经递质系统异常

有证据表明乙酰胆碱与环境不确定性的编码有关,影响自上而下对刺激驱动皮层反应的抑制作用(Yu & Dayan, 2005)。基底前脑是皮层胆碱能调节的主要来源,可增强视觉输入的 V1 反应,减

弱听觉刺激重复的神经抑制(Moran et al., 2013)。这为乙酰胆碱调节感知预测误差的精度提供了证据。在 ASD 中,有研究报告基底前脑神经元病理(Kemper & Bauman, 1998),形态异常(Riva et al., 2011)和皮质胆碱能受体功能减弱(Perry et al., 2001)。小鼠动物模型研究发现,系统地增加乙酰胆碱的可用性可以缓解 ASD 行为症状(Karvat & Kimchi, 2014)。然而,目前几乎没有神经化学证据表明 ASD 个体脑乙酰胆碱水平较低。因而,需要更多的药理和神经成像研究更好地描述胆碱能神经调节在 ASD 个体中的作用。

5.1.3 多巴胺神经递质系统异常

多巴胺通过多巴胺 β -羟化酶的作用在突触前转化为去甲肾上腺素。这意味着多巴胺的可用性是去甲肾上腺素功能的关键决定因素。去甲肾上腺素在知觉学习任务中编码“意想不到的不确定性”时发挥重要作用(Yu & Dayan, 2005),是环境变化的信号,从而导致自下而上的丘脑皮层感知输入信号的传递增强(Vivanti et al., 2018)。神经生物研究发现 ASD 个体及其一级亲属的去甲肾上腺素存在异常(Robinson et al., 2001)。其中,瞳孔扩张追踪值得更新信念的事件,反映了神经增益的调节,因而瞳孔大小是释放去甲肾上腺素的一个指标(Kreis et al., 2023)。有研究证实,与对照组比较而言,在感知线索/目标学习任务中,ASD 个体对学习环境波动条件的瞳孔扩张反应增强(Lawson et al., 2017);在一项概率逆转任务中,瞳孔测量数据表明具有较高孤独症特质的个体对需要进行信念更新的事件和不需要进行信念更新的事件的区分程度较小(Kreis et al., 2023)。上述研究结果表明去甲肾上腺素异常的反应与受损的神经增益相一致。

5.2 由上至下的反馈联结异常——先验信念精度过低

5.2.1 预测脑区神经活动异常

ASD 个体的预测缺陷由异常的神经生理结构或功能导致(Geschwind, 2011)。研究证实 ASD 个体在参与预测的关键脑区, 包括基底神经节、前扣带回和小脑中存在异常。首先, 基底神经节的活动受刺激新奇性的调节(Joshua et al., 2010)。ASD 个体基底神经节过度激活导致新的外界刺激权重过高, 先验及环境的调节作用减弱, 影响对事件概率的准确估计, 这种学习的超塑性在 ASD 小鼠模型中得到证实(Rinaldi et al., 2010)。其次, 前扣带回皮层是“突显网络”的主要脑区(Limongi et al., 2013)。有证据表明, 扣带回皮层不仅表征预测误差, 还执行作为精度自适应调节基础的计算(Metereau & Dreher, 2013)。研究发现, ASD 个体对视觉新奇刺激进行反应时, 背侧前扣带回皮层过度激活(Dichter et al., 2009), 而在社会预测错误期间前扣带回皮层神经反应减少, 且与症状严重程度相关(Balsters et al., 2017)。最后, 神经影像学、临床和动物研究发现小脑支持运动和非运动领域的自适应预测。小脑功能在于形成预测模型来校准行动, 并使其适应不断变化的环境。小脑预测模型也可以扩展到非运动行为中, 原发性小脑功能障碍可引起社交障碍(Frosch et al., 2022)。已有神经影像学研究报告 ASD 个体小脑结构和功能异常(Kelly et al., 2020)。小脑预测模型的发育中断可能是 ASD 个体预测缺陷的基础(Stoodley & Tsai, 2021)。

5.2.2 预测脑区功能联结减弱

大脑中长期联结的信息整合促进不同的认知功能, 这些功能对背景信息很敏感(Hermundstad et al., 2013)。背景信息被认为是一系列在时间上分离的事件, 通过工作记忆以预测目标相关信息的形式进行整合和维持。背景信息的目标导向加工已被证明与基于额叶网络的自上而下加工相关(Fogelson, 2015)。有研究证实, 与对照组相比, ASD 成人在加工预测目标的过程中功能联通性较弱, 特别是当刺激为情绪面孔时(Fogelson et al., 2019)。然而, 该研究用于评估功能联通性的方法没有方向性信息, 因而还无法确定观察到的联通性异常是否与自上而下的功能网络有关。为了探究此问题, Fogelson 和 Diaz-Brage (2021)运用相位

转移熵(Phase Transfer Entropy, PTE), 一种能够测量两个系统之间信息流的强度和方向的功能联通性估计方法。结果发现, ASD 个体在预测刺激加工过程中自上而下的额叶-顶叶功能联通性减弱。为了阐明视觉领域的振荡动力学和联通性, Seymour 等(2019)运用相位振幅耦合(Phase Amplitude Coupling, PAC)技术, 采用视觉光栅范式, 利用非参数 Granger 因果关系估计了视觉区域 V1 和 V4 之间的定向联通性。结果发现, 由 gamma (40~80 Hz)振荡介导的 V1-V4 前馈联结, 在 ASD 组和对照组之间是相当, 然而由 alpha (8~13 Hz)振荡介导的 V4-V1 反馈联结在 ASD 组中显著降低。与预测编码解释一致, 这意味着 ASD 个体基于 alpha 波段振荡对视觉输入自上而下的反馈调制减少。

5.2.3 预测信息神经信号降低

使用先验进行预测需要将存储在神经信号中的可预测信息重新激活。因此, 信息存储测量是探究预测编码皮层功能的有效工具(Grossberg, 2013)。脑神经动力学指标“主动信息存储”(Active Information Storage, AIS)能够直接检验 PCT 的核心假设。有研究证实, ASD 个体在海马/下神经带获得的神经信号中 AIS 降低。这说明 ASD 个体要么是动态丰富程度降低, 要么是信息可预测性降低, 要么两者兼而有之(Gomez et al., 2014)。随后, 另有研究通过记录静息态脑磁图比较 ASD 和 TD 组神经信号中的可预测信息储存量(Brodski-Guerniero et al., 2018)。该研究在全脑水平上复制了 Gómez 等(2014)基于大脑局部兴趣区的研究结果。全脑波束形成源分析显示, 与对照组相比, ASD 组的静息态神经活动显示出较少的可预测信息, 且与 ASD 组非社会症状严重程度呈负相关。上述结果与先验信念精度降低的观点一致, 与增强的感官表征观点不一致, 因为后者应导致 AIS 增加而非减少。

6 总结与展望

随着预测编码理论不断发展, 学者们提出了孤独症的预测缺陷假说, 将 ASD 个体的感知运动、认知学习和社交言语等多领域缺陷视为预测缺陷的不同表现(Pellicano & Burr, 2012; van de Cruys et al., 2014)。在 PIA 中, 不同的研究者依据不同推理模型又提出了不同假说。Pellicano 和

Burr (2012)依据贝叶斯推理提出“低先验”假说即先验权重降低。van de Cruys 等(2014)依据层级性推理提出“HIPPEA”假说即精度调节缺陷。虽然在机制上有所不同,但两个假说都意味着感知/后验更偏向感官输入,即感官输入与先验信念之间的权重异常。由于预测误差精度是感官输入精度和先验信念精度之比的函数,因而自下而上的感官输入精度过高或自上而下的先验信念精度过低都将导致预测误差精度过高,也即感知/后验更偏向于感官输入。由此可见,两者之间的权重异常实际上是源于两者之间的精度失衡。这种精度失衡的预测机制将导致 ASD 个体生成对某一具体情境过度拟合的内部预测模型。这种预测模型一方面不能有效地解释后续感官输入,尤其是感官细节总是变化的社会情境,另一方面为减少预测误差过多带来的感觉超载的厌恶感进而更多采用主动性推理坚持环境的一致性。因而,ASD 个体多领域缺陷与其两大核心症状都可由先验信念与感官输入之间的精度失衡来解释。由此可见,该理论为 ASD 提供了可信统一的解释模型。然而,以下四个方面仍需进一步深入探究。

6.1 探究 ASD 个体预测缺陷领域特异性

如前所述,ASD 个体在不同领域中不同先验类型的相对权重并非普遍降低(Tewolde et al., 2018),而是具有广泛的任务或情境敏感性(Palmer et al., 2017)。具体而言,在感知运动领域中,ASD 个体运用感知先验进行预测的能力因刺激性质(社会性与非社会性)、加工水平(高与低)、感觉通道(听觉与视觉)和反应类型(动作与眼动)不同而不同。在认知学习领域中,ASD 个体学习并运用经验先验进行预测的能力受学习方式(内隐/外显)、学习次数(多/少)、学习线索的价值水平(限制性/非限制性)、学习线索的社会属性(社会性/非社会性)等变量的影响。与前两个领域研究结果存在较大分歧不同,社交言语领域的研究结果较为一致证实,ASD 个体普遍存在运用社会性系统先验进行预测的缺陷。但相较于前两个领域,社交言语领域的研究较为有限。因此,未来的研究应操纵前述变量系统探究 ASD 个体运用不同先验类型进行预测的能力,尤其是社交言语领域中社会性系统先验的运用能力,进一步验证“低先验”假说。

6.2 考察 ASD 个体反应性精度调节能力

与探究先验权重的研究比较而言,探究 ASD

个体基于环境波动的反应性精度调节能力的研究相对较少。这可能是由于目前的技术难以区分异常的预测误差信号和异常的学习速率之间的相互作用。目前,仅有两项研究通过对表征学习进行计算模拟和参数拟合直接考察了 ASD 个体的反应性精度调节能力——基于预测误差模式调节误差信号和学习速率的能力(Lawson et al., 2018; Manning et al., 2017)。然而研究结果存在分歧。未来的研究应系统操纵感官输入分布变异(宽/窄)、环境的波动程度(强/弱)和波动顺序(前/后)、加工层次(感知任务/决策任务)等变量,考察 ASD 个体是否存在基于环境波动的反应性精度调节缺陷,对“HIPPEA”假说进行进一步验证。

6.3 揭示 ASD 个体预测缺陷的潜在机制

使用行为方法来评估自下而上和自上而下信号的精度及其它们的整合是十分困难的。因为在许多情况下,它们对显性行为产生类似的影响。因而直接评估自上而下和自下而上精度及其整合信号的研究还较少。目前为止,Skewes 等(2015)运用信号检测理论澄清上述分歧。实验结果支持先验精度降低而非感官精度增强。然而,Coll 等(2020)采用能够独立标记自上而下预测信号和自下而上感官信号及两者集成信号的分层频率标记脑电范式探索该问题。结果表明,低孤独特质个体的整合信号随刺激重复的增加而增加,而高孤独特质个体无此效应。这可能是高孤独特质个体的感官表征更精确进而混淆由刺激重复而增加的先验精度的影响作用。鉴于上述分歧,未来应运用具有优秀的时间分辨率和复杂的源定位技术的脑磁图开发出更多能够区分前馈联结与反馈联结信号的新技术,如相位转移熵(Fogelson & Diaz-Brage, 2021)和相位振幅耦合(Seymour et al., 2019)技术,进一步揭示 ASD 个体预测编码缺陷的潜在机制。

6.4 开发 ASD 个体预测性干预康复方案

如前所述,ASD 个体可以通过经验学习来补偿薄弱的社会性系统先验,一旦成功内化便可有效利用(Chambon et al., 2017)。此外,ASD 个体并非不具备预测学习能力,只是需要更多暴露机会(Ganglmayer et al., 2020)以及更明确的指导(Ego et al., 2016)。由此可见,以培养预测技能为核心的干预策略具有可行性。鉴于此,未来应进一步开发以 PCT 为框架的康复方案,首先为 ASD 个体提

供简单稳定熟悉的环境,随后逐步少量提供新的感觉输入,并在较长时间内重复呈现,使其慢慢获得外部环境的内在表征。目前,仅有 Hallett 等 (2021) 初步证实了父母介入的“预测性养育”干预方案的可行性。该方案将育儿策略整合到预测编码框架中,旨在增加 ASD 儿童对日常活动的理解,帮助儿童应对环境中的不确定性,有效提高 ASD 儿童的日常功能,并缓解其焦虑情绪。

参考文献

- American Psychiatric Association, D., & Association, A. P. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-5* (Vol. 5). American psychiatric association Washington, DC.
- Amoruso, L., Narzisi, A., Pinzino, M., Finisguerra, A., Billeci, L., Calderoni, S., ... 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>
- Angeletos Chrysaitis, N., & Seriès, P. (2023). 10 years of bayesian theories of autism: A comprehensive review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 145, 105022. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.105022>
- Arnal, L. H., Wyart, V., & Giraud, A. L. (2011). Transitions in neural oscillations reflect prediction errors generated in audiovisual speech. *Nature Neuroscience*, 14(6), 797–801. <https://doi.org/10.1038/nn.2810>
- Arthur, T., Vine, S., Brosnan, M., & Buckingham, G. (2019). Exploring how material cues drive sensorimotor prediction across different levels of autistic-like traits. *Experimental Brain Research*, 237(9), 2255–2267. <https://doi.org/10.1007/s00221-019-05586-z>
- Arthur, T., Vine, S., Brosnan, M., & Buckingham, G. (2020). Predictive sensorimotor control in autism. *Brain*, 143(10), 3151–3163. <https://doi.org/10.1093/brain/awaa243>
- Arthur, T., Harris, D., Buckingham, G., Brosnan, M., Wilson, M., Williams, G., & Vine, S. (2021). An examination of active inference in autistic adults using immersive virtual reality. *Scientific Reports*, 11(1), 20377. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99864-y>
- Arthur, T., Brosnan, M., Harris, D., Buckingham, G., Wilson, M., Williams, G., & Vine, S. (2022). Investigating how explicit contextual cues affect predictive sensorimotor control in autistic adults. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 53, 4368–4381. <https://doi.org/10.1007/s10803-022-05718-5>
- Balsters, J. H., Apps, M. A., Bolis, D., Lehner, R., Gallagher, L., & Wenderoth, N. (2017). Disrupted prediction errors index social deficits in autism spectrum disorder. *Brain*, 140(1), 235–246. <https://doi.org/10.1093/brain/aww287>
- Barrett, L. F., Quigley, K. S., & Hamilton, P. (2016). An active inference theory of allostasis and interoception in depression. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1708), Article 20160011. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0011>
- Barzy, M., Black, J., Williams, D., & Ferguson, H. J. (2020). Autistic adults anticipate and integrate meaning based on the speaker's voice: Evidence from eye-tracking and event-related potentials. *Journal of Experimental Psychology: General*, 149(6), 1097–1115. <https://doi.org/10.1037/xge0000705>
- Beker, S., Foxe, J. J., & Molholm, S., (2021). Oscillatory entrainment mechanisms and anticipatory predictive processes in children with autism spectrum disorder. *Journal of Neurophysiology*, 126(5), 1783–1798. <https://doi.org/10.1152/jn.00329.2021>
- Ben-Sasson, A., Hen, L., Fluss, R., Cermak, S. A., Engel-Yeger, B., & Gal, E. (2009). A meta-analysis of sensory modulation symptoms in individuals with autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 39(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10803-008-0593-3>
- Bianco, V., Finisguerra, A., Betti, S., D'Argenio, G., & Urgesi, C. (2020). Autistic traits differently account for context-based predictions of physical and social events. *Brain Sciences*, 10(7), 418. <https://doi.org/10.3390/brainsci10070418>
- Bidet-Caulet, A., Barbe, P. G., Roux, S., Viswanath, H., Barthelemy, C., Bruneau, N., ... Bonnet-Brilhault, F. (2012). Dynamics of anticipatory mechanisms during predictive context processing. *European Journal of Neuroscience*, 36(7), 2996–3004. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2012.08223.x>
- Braukmann, R., Ward, E., Hessels, R. S., Bekkering, H., Buitelaar, J. K., & Hunnius, S. (2018). Action prediction in 10-month-old infants at high and low familial risk for autism spectrum disorder. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 49, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2018.02.004>
- Brisson, J., Warreyn, P., Serres, J., Foussier, S., & Adrien-Louis, J. (2012). Motor anticipation failure in infants with autism: A retrospective analysis of feeding situations. *Autism*, 16(4), 420–429. <https://doi.org/10.1177/1362361311423385>
- Brock, J. (2012). Alternative bayesian accounts of autistic perception: Comment on pellicano and burr. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(12), 573–574. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.005>
- Brodski-Guerniero, A., Naumer, M. J., Moliadze, V., Chan, J., Althen, H., Ferreira-Santos, F., ... Wibral, M. (2018). Predictable information in neural signals during resting state is reduced in autism spectrum disorder. *Human Brain Mapping*, 39(8), 3227–3240. <https://doi.org/10.1002/hbm.24072>
- Bulf, H., Johnson, S. P., & Valenza, E. (2011). Visual statistical learning in the newborn infant. *Cognition*, 121(1), 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2011.06.010>

- 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>
- Cattaneo, L., Fabbri-Destro, M., Boria, S., Pieraccini, C., Monti, A., Cossu, G., & Rizzolatti, G. (2007). Impairment of actions chains in autism and its possible role in intention understanding. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104*(45), 17825–17830. <https://doi.org/10.1073/pnas.0706273104>
- Chambon, V., Farrer, C., Pacherie, E., Jacquet, P. O., Leboyer, M., & Zalla, T. (2017). Reduced sensitivity to social priors during action prediction in adults with autism spectrum disorders. *Cognition, 160*, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.12.005>
- Chan, J. S., Langer, A., & Kaiser, J. (2016). Temporal integration of multisensory stimuli in autism spectrum disorder: A predictive coding perspective. *Journal of Neural Transmission, 123*(8), 917–923. <https://doi.org/10.1007/s00702-016-1587-5>
- Coll, M. P., Whelan, E., Catmur, C., & Bird, G. (2020). Autistic traits are associated with atypical precision-weighted integration of top-down and bottom-up neural signals. *Cognition, 199*, 104236. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104236>
- Constant, A., Bervoets, J., Hens, K., & van de Cruys, S. (2020). Precise worlds for certain minds: An ecological perspective on the relational self in autism. *Topoi, 39*(3), 611–622. <https://doi.org/10.1007/s11245-018-9546-4>
- Cook, R., Brewer, R., Shah, P., & Bird, G. (2014). Intact facial adaptation in autistic adults. *Autism Research, 7*(4), 481–490. <https://doi.org/10.1002/aur.1381>
- Crane, L., Goddard, L., & Pring, L. (2009). Sensory processing in adults with autism spectrum disorders. *Autism, 13*(3), 215–228. <https://doi.org/10.1177/1362361309103794>
- Crawley, D., Zhang, L., Jones, E. J. H., Ahmad, J., Oakley, B., Caceres, A. S., ... Grp, E. -A. L. (2020). Modeling flexible behavior in childhood to adulthood shows age-dependent learning mechanisms and less optimal learning in autism in each age group. *Plos Biology, 18*(10), Article e3000908. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000908>
- David, F. J., Baranek, G. T., Giuliani, C. A., Mercer, V. S., Poe, M. D., & Thorpe, D. E. (2009). A pilot study: Coordination of precision grip in children and adolescents with high functioning autism. *Pediatric Physical Therapy, 21*(2), 205–211. <https://doi.org/10.1097/PEP.0b013e3181a3afc2>
- Dichter, G. S., Felder, J. N., & Bodfish, J. W. (2009). Autism is characterized by dorsal anterior cingulate hyperactivation during social target detection. *Social Cognitive and Affective Neuroscience, 4*(3), 215–226. <https://doi.org/10.1093/scan/nsp017>
- Ego, C., Bonhomme, L., Xivry, J. -J. O. d., Fonseca, D. D., Lefèvre, P., Masson, G. S., & Deruelle, C. (2016). Behavioral characterization of prediction and internal models in adolescents with autistic spectrum disorders. *Neuropsychologia, 91*, 335–345. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.08.021>
- Ego, C., Yüksel, D., Xivry, J. -J. O. d., & Lefèvre, P. (2016). Development of internal models and predictive abilities for visual tracking during childhood. *Journal of Neurophysiology, 115*(1), 301–309. <https://doi.org/10.1152/jn.00534.2015>
- Ewbank, M. P., Pell, P. J., Powell, T. E., von dem Hagen, E. A. H., Baron-Cohen, S., & Calder, A. J. (2017). Repetition suppression and memory for faces is reduced in adults with autism spectrum conditions. *Cerebral Cortex, 27*(1), 92–103. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw373>
- Ewing, L., Pellicano, E., & Rhodes, G. (2013). Atypical updating of face representations with experience in children with autism. *Developmental Science, 16*(1), 116–123. <https://doi.org/10.1111/desc.12007>
- Finnemann, J. J. S., Plaisted-Grant, K., Moore, J., Teufel, C., & Fletcher, P. C. (2021). Low-level, prediction-based sensory and motor processes are unimpaired in autism. *Neuropsychologia, 156*, 107835. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.107835>
- Fogelson, N. (2015). Neural correlates of local contextual processing across stimulus modalities and patient populations. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 52*, 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.02.016>
- Fogelson, N., & Diaz-Brage, P. (2021). Altered directed connectivity during processing of predictive stimuli in psychiatric patient populations. *Clinical Neurophysiology, 132*(11), 2739–2750. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2021.07.025>
- Fogelson, N., Li, L., Diaz-Brage, P., Amatriain-Fernandez, S., & Valle-Inclan, F. (2019). Altered predictive contextual processing of emotional faces versus abstract stimuli in adults with autism spectrum disorder. *Clinical Neurophysiology, 130*(6), 963–975. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.03.031>
- Font-Alaminos, M., Cornella, M., Costa-Faidella, J., Hervás, A., Leung, S., Rueda, I., & Escera, C. (2020). Increased subcortical neural responses to repeating auditory stimulation in children with autism spectrum disorder. *Biological Psychology, 149*, Article 107807. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2019.107807>
- Forti, S., Valli, A., Perego, P., Nobile, M., Crippa, A., & Molteni, M. (2011). Motor planning and control in autism. A kinematic analysis of preschool children. *Research in Autism Spectrum Disorders, 5*(2), 834–842. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2010.09.013>
- Fournier, K. A., Hass, C. J., Naik, S. K., Lodha, N., & Cauraugh, J. H. (2010). Motor coordination in autism spectrum disorders: A synthesis and meta-analysis. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 40*(10), 1227–1240. <https://doi.org/10.1007/s10803-010-0981-3>
- Friston, K. J. (2005). A theory of cortical responses.

- Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1456), 815–836. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1622>
- Friston, K. J., Lawson, R., & Frith, C. D. (2013). On hyperpriors and hypopriors: Comment on pellicano and burr. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(1), 1–1. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.11.003>
- Frosch, I. R., Mittal, V. A., & D'Mello, A. M. (2022). Cerebellar contributions to social cognition in ASD: A predictive processing framework. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 16, Article 810425. <https://doi.org/10.3389/fnint.2022.810425>
- Fulceri, F., Tonacci, A., Lucaferro, A., Apicella, F., Narzisi, A., Vincenti, G., ... Contaldo, A. (2018). Interpersonal motor coordination during joint actions in children with and without autism spectrum disorder: The role of motor information. *Research in Developmental Disabilities*, 80, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2018.05.018>
- Ganglmayer, K., Schuwerk, T., Sodian, B., & Paulus, M. (2020). Do children and adults with autism spectrum condition anticipate others' actions as goal-directed? A predictive coding perspective. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 50(6), 2077–2089. <https://doi.org/10.1007/s10803-019-03964-8>
- Geschwind, D. H. (2011). Genetics of autism spectrum disorders. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(9), 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.07.003>
- Gomez, C., Lizio, J. T., Schaum, M., Wollstadt, P., Grutzner, C., Uhlhaas, P., ... Wibral, M. (2014). Reduced predictable information in brain signals in autism spectrum disorder. *Frontiers in Neuroinformatics*, 8, 9. <https://doi.org/10.3389/fninf.2014.00009>
- Goris, J., Braem, S., Nijhof, A. D., Rigoni, D., Deschrijver, E., van de Cruys, S., ... 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>
- Goris, J., Silvetti, M., Verguts, T., Wiersma, J. R., Brass, M., & Braem, S. (2020). Autistic traits are related to worse performance in a volatile reward learning task despite adaptive learning rates. *Autism*, 25(2), 440–451. <https://doi.org/10.1177/1362361320962237>
- Gowen, E., & Hamilton, A. (2013). Motor abilities in autism: A review using a computational context. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 43(2), 323–344. <https://doi.org/10.1007/s10803-012-1574-0>
- Greene, R. K., Zheng, S., Kinard, J. L., Mosner, M. G., Wiesen, C. A., Kennedy, D. P., & Dichter, G. S. (2019). Social and nonsocial visual prediction errors in autism spectrum disorder. *Autism Research*, 12(6), 878–883. <https://doi.org/10.1002/aur.2090>
- Grisoni, L., Mohr, B., & Pulvermuller, F. (2019). Prediction mechanisms in motor and auditory areas and their role in sound perception and language understanding. *NeuroImage*, 199, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.05.071>
- Grossberg, S. (2013). Adaptive resonance theory: How a brain learns to consciously attend, learn, and recognize a changing world. *Neural Networks*, 37, 1–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neunet.2012.09.017>
- Guiraud, J. A., Kushnerenko, E., Tomalski, P., Davies, K., Ribeiro, H., Johnson, M. H., & Team, B. (2011). Differential habituation to repeated sounds in infants at high risk for autism. *Neuroreport*, 22(16), 845–849. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e32834c0bec>
- Haker, H., Schneebeli, M., & Stephan, K. E. (2016). Can bayesian theories of autism spectrum disorder help improve clinical practice? *Front Psychiatry*, 7, 107. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2016.00107>
- Hallett, V., Mueller, J., Breese, L., Hollett, M., Beresford, B., Irvine, A., ... Simonoff, E. (2021). Introducing 'predictive parenting': A feasibility study of a new group parenting intervention targeting emotional and behavioral difficulties in children with autism spectrum disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 51(1), 323–333. <https://doi.org/10.1007/s10803-020-04442-2>
- Heeger, D. J. (2017). Theory of cortical function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(8), 1773–1782. <https://doi.org/10.1073/pnas.1619788114>
- Hermundstad, A. M., Bassett, D. S., Brown, K. S., Aminoff, E. M., Clewett, D., Freeman, S., ... Carlson, J. M. (2013). Structural foundations of resting-state and task-based functional connectivity in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(15), 6169–6174. <https://doi.org/10.1073/pnas.1219562110>
- Horder, J., Lavender, T., Mendez, M. A., O'Gorman, R., Daly, E., Craig, M. C., ... Murphy, D. G. (2014). Reduced subcortical glutamate/glutamine in adults with autism spectrum disorders: A [¹H]MRS study. *Translational Psychiatry*, 4, Article e364. <https://doi.org/10.1038/tp.2014.7>
- Hudson, M., Nicholson, T., Kharko, A., McKenzie, R., & Bach, P. (2021). Predictive action perception from explicit intention information in autism. *Psychonomic Bulletin and Review*, 28(5), 1556–1566. <https://doi.org/10.3758/s13423-021-01941-w>
- Jafe-Dax, S., & Eigsti, I. -M. (2020). Perceptual inference is impaired in individuals with ASD and intact in individuals who have lost the autism diagnosis. *Scientific Reports*, 10(1), 17085. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72896-6>
- Jamal, W., Cardinaux, A., Haskins, A. J., Kjelgaard, M., & Sinha, P. (2020). Reduced sensory habituation in autism and its correlation with behavioral measures. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 51, 3153–3164. <https://doi.org/10.1007/s10803-020-04780-1>
- Joshua, M., Adler, A., & Bergman, H. (2010). Novelty

- encoding by the output neurons of the basal ganglia. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 3, 20–20. <https://doi.org/10.3389/neuro.06.020.2009>
- Karaminis, T., Arrighi, R., Forth, G., Burr, D., & Pellicano, E. (2020). Adaptation to the speed of biological motion in autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 50(2), 373–385. <https://doi.org/10.1007/s10803-019-04241-4>
- Karaminis, T., Cicchini, G. M., Neil, L., Cappagli, G., Aagten-Murphy, D., Burr, D., & Pellicano, E. (2016). Central tendency effects in time interval reproduction in autism. *Scientific Reports*, 6, Article 28570. <https://doi.org/10.1038/srep28570>
- Karaminis, T., Turi, M., Neil, L., Badcock, N. A., Burr, D., & Pellicano, E. (2015). Atypicalities in perceptual adaptation in autism do not extend to perceptual causality. *Plos One*, 10(3), Article e0120439. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120439>
- Karvat, G., & Kimchi, T. (2014). Acetylcholine elevation relieves cognitive rigidity and social deficiency in a mouse model of autism. *Neuropsychopharmacology*, 39(4), 831–840. <https://doi.org/10.1038/npp.2013.274>
- Kelly, E., Meng, F. T., Fujita, H., Morgado, F., Kazemi, Y., Rice, L. C., ... Tsai, P. T. (2020). Regulation of autism-relevant behaviors by cerebellar-prefrontal cortical circuits. *Nature Neuroscience*, 23(9), 1102–1110. <https://doi.org/10.1038/s41593-020-0665-z>
- Kemper, T. L., & Bauman, M. (1998). Neuropathology of infantile autism. *Journal of Neuropathology and Experimental Neurology*, 57(7), 645–652. <https://doi.org/10.1097/00005072-199807000-00001>
- Khan, S., Michmizos, K., Tommerdahl, M., Ganesan, S., Kitzbichler, M. G., Zetino, M., ... Kenet, T. (2015). Somatosensory cortex functional connectivity abnormalities in autism show opposite trends, depending on direction and spatial scale. *Brain*, 138(5), 1394–1409. <https://doi.org/10.1093/brain/awv043>
- Kinard, J. L., Mosner, M. G., Greene, R. K., Addicott, M., Bizzell, J., Petty, C., ... Dichter, G. S. (2020). Neural mechanisms of social and nonsocial reward prediction errors in adolescents with autism spectrum disorder. *Autism Research*, 13(5), 715–728. <https://doi.org/10.1002/aur.2273>
- Kirkham, N. Z., Slemmer, J. A., Richardson, D. C., & Johnson, S. P. (2007). Location, location, location: Development of spatiotemporal sequence learning in infancy. *Child Development*, 78(5), 1559–1571. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01083.x>
- Knight, E. J., Oakes, L., 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. *Autism Research*, 13(12), 2058–2072. <https://doi.org/10.1002/aur.2362>
- Kolesnik, A., Ali, J. B., Gliga, T., Guiraud, J., Charman, T., Johnson, M. H., ... Team, B. (2019). Increased cortical reactivity to repeated tones at 8 months in infants with later ASD. *Translational Psychiatry*, 9, Article 46. <https://doi.org/10.1038/s41398-019-0393-x>
- Kreis, I., Zhang, L., Mittner, M., Sylva, L., Lamm, C., & Pfuhl, G. (2023). Aberrant uncertainty processing is linked to psychotic-like experiences, autistic traits, and is reflected in pupil dilation during probabilistic learning. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 23(3), 905–919. <https://doi.org/10.3758/s13415-023-01088-2>
- Krogh-Jespersen, S., Kaldy, Z., Valadez, A. G., Carter, A. S., & Woodward, A. L. (2018). Goal prediction in 2-year-old children with and without autism spectrum disorder: An eye-tracking study. *Autism Research*, 11(6), 870–882. <https://doi.org/10.1002/aur.1936>
- Kunchulia, M., Tatishvili, T., Lomidze, N., Parkosadze, K., & Thomaschke, R. (2017). Time-based event expectancies in children with autism spectrum disorder. *Experimental Brain Research*, 235(9), 2877–2882. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5024-2>
- Kunchulia, M., Tatishvili, T., Parkosadze, K., Lomidze, N., & Thomaschke, R. (2020). Children with autism spectrum disorder show increased sensitivity to time-based predictability. *International Journal of Developmental Disabilities*, 66(3), 214–221. <https://doi.org/10.1080/20473869.2018.1564447>
- Landa, R. J., Haworth, J. L., & Nebel, M. B. (2016). Ready, set, go! Low anticipatory response during a dyadic task in infants at high familial risk for autism. *Frontiers in Psychology*, 7, Article 721. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00721>
- Lawson, R. P., Aylward, J., Roiser, J. P., & Rees, G. (2018). Adaptation of social and non-social cues to direction in adults with autism spectrum disorder and neurotypical adults with autistic traits. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 29, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.05.001>
- Lawson, R. P., Aylward, J., White, S., & Rees, G. (2015). A striking reduction of simple loudness adaptation in autism. *Scientific Reports*, 5, Article 16157. <https://doi.org/10.1038/srep16157>
- Lawson, R. P., Mathys, C., & Rees, G. (2017). Adults with autism overestimate the volatility of the sensory environment. *Nature Neuroscience*, 20(9), 1293–1299. <https://doi.org/10.1038/nn.4615>
- Lawson, R. P., Rees, G., & Friston, K. J. (2014). An aberrant precision account of autism. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 302. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00302>
- Lieder, I., Adam, V., Frenkel, O., Jaffe-Dax, S., Sahani, M., & Ahissar, M. (2019). Perceptual bias reveals slow-updating in autism and fast-forgetting in dyslexia. *Nature Neuroscience*, 22(2), 256–264. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0308-9>

- Limongi, R., Sutherland, S. C., Zhu, J., Young, M. E., & Habib, R. (2013). Temporal prediction errors modulate cingulate-insular coupling. *NeuroImage*, 71, 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.12.078>
- Manning, C., Kilner, J., Neil, L., Karaminis, T., & Pellicano, E. (2017). Children on the autism spectrum update their behaviour in response to a volatile environment. *Developmental Science*, 20(5), 1–13. <https://doi.org/10.1111/desc.12435>
- Maule, J., Stanworth, K., Pellicano, E., & Franklin, A. (2018). Color afterimages in autistic adults. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 48(4), 1409–1421. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2786-5>
- Metereau, E., & Dreher, J. C. (2013). Cerebral correlates of salient prediction error for different rewards and punishments. *Cerebral Cortex*, 23(2), 477–487. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs037>
- Mosner, M. G., McLaurin, R. E., Kinard, J. L., Hakimi, S., Parelman, J., Shah, J. S., ... Dichter, G. S. (2019). Neural mechanisms of reward prediction error in autism spectrum disorder. *Autism Research and Treatment*, 10–10. <https://doi.org/10.1155/2019/5469191>
- Millin, R., Kolodny, T., Flevaris, A. V., Kale, A. M., Schallmo, M. P., Gerdt, J., ... Murray, S. (2018). Reduced auditory cortical adaptation in autism spectrum disorder. *Elief*, 7, Article e36493. <https://doi.org/10.7554/eLife.36493>
- Mitchel, A. D., Christiansen, M. H., & Weiss, D. J. (2014). Multimodal integration in statistical learning: Evidence from the McGurk illusion. *Frontiers in Psychology*, 5, Article 407. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00407>
- Moran, R. J., Campo, P., Symmonds, M., Stephan, K. E., Dolan, R. J., & Friston, K. J. (2013). Free energy, precision and learning: The role of cholinergic neuromodulation. *Journal of Neuroscience*, 33(19), 8227–8236. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4255-12.2013>
- Noel, J. P., de Nier, M. A., Stevenson, R., Alais, D., & Wallace, M. T. (2017). Atypical rapid audio-visual temporal recalibration in autism spectrum disorders. *Autism Research*, 10(1), 121–129. <https://doi.org/10.1002/aur.1633>
- Northrup, J. B., Libertus, K., & Iverson, J. M. (2017). Response to changing contingencies in infants at high and low risk for autism spectrum disorder. *Autism Research*, 10(7), 1239–1248. <https://doi.org/10.1002/aur.1770>
- Ong, J. H., & Liu, F. (2023). Probabilistic learning of cue-outcome associations is not influenced by autistic traits. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 53(10), 4047–4059. <https://doi.org/10.1007/s10803-022-05690-0>
- Palmer, C. J., Lawson, R. P., & Hohwy, J. (2017). Bayesian approaches to autism: Towards volatility, action, and behavior. *Psychological Bulletin*, 143(5), 521–542. <https://doi.org/10.1037/bul0000097>
- Palumbo, L., Burnett, H. G., & Jellema, T. (2015). Atypical emotional anticipation in high-functioning autism. *Molecular Autism*, 6, Article 47. <https://doi.org/10.1186/s13229-015-0039-7>
- Park, W. J., Schauder, K. B., Kwon, O. S., Bennetto, L., & Tadin, D. (2021). Atypical visual motion-prediction abilities in autism spectrum disorder. *Clinical Psychological Science*, 9(5), 944–960. <https://doi.org/10.1177/2167702621991803>
- 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>
- Pellicano, E., Rhodes, G., & Calder, A. J. (2013). Reduced gaze aftereffects are related to difficulties categorising gaze direction in children with autism. *Neuropsychologia*, 51(8), 1504–1509. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.03.021>
- Perry, E. K., Lee, M. L. W., Martin-Ruiz, C. M., Court, J. A., Volsen, S. G., Merrit, J., ... Wenk, G. L. (2001). Cholinergic activity in autism: Abnormalities in the cerebral cortex and basal forebrain. *American Journal of Psychiatry*, 158(7), 1058–1066. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.158.7.1058>
- Prescott, K. E., Mathee-Scott, J., Reuter, T., Edwards, J., Saffran, J., & Ellis Weismer, S. (2022). Predictive language processing in young autistic children. *Autism Research*, 15(5), 892–903. <https://doi.org/10.1002/aur.2684>
- Puts, N. A. J., Wodka, E. L., Tommerdahl, M., Mostofsky, S. H., & Edden, R. A. E. (2014). Impaired tactile processing in children with autism spectrum disorder. *Journal of Neurophysiology*, 111(9), 1803–1811. <https://doi.org/10.1152/jn.00890.2013>
- Retzler, C., Boehm, U., Cai, J., Cochrane, A., & Manning, C. (2021). Prior information use and response caution in perceptual decision-making: No evidence for a relationship with autistic-like traits. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 74(11), 1953–1965. <https://doi.org/10.1177/17470218211019939>
- Rhodes, G., Burton, N., Jeffery, L., Read, A., Taylor, L., & Ewing, L. (2018). Facial expression coding in children and adolescents with autism: Reduced adaptability but intact norm-based coding. *British Journal of Psychology*, 109(2), 204–218. <https://doi.org/10.1111/bjop.12257>
- Righi, G., Tierney, A. L., Tager-Flusberg, H., & Nelson, C. A. (2014). Functional connectivity in the first year of life in infants at risk for autism spectrum disorder: An EEG study. *Plos One*, 9(8), Article e105176. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105176>
- Rinaldi, C. R., Rinaldi, P., Alagia, A., Gemei, M., Esposito, N., Formiggini, F., ... Pane, F. (2010). Preferential nuclear accumulation of jak2v617f in cd34(+) but not in granulocytic, megakaryocytic, or erythroid cells of patients with philadelphia-negative myeloproliferative neoplasia. *Blood*,

- 116(26), 6023–6026. <https://doi.org/10.1182/blood-2010-08-302265>
- Riva, D., Bulgheroni, S., Aquino, D., di Salle, F., Savoiardo, M., & Erbetta, A. (2011). Basal forebrain involvement in low-functioning autistic children: A voxel-based morphometry study. *American Journal of Neuroradiology*, 32(8), 1430–1435. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A2527>
- Robic, S., Sonie, S., Fonlupt, P., Henaff, M. A., Touil, N., Coricelli, G., ... Schmitz, C. (2015). Decision-making in a changing world: A study in autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 45(6), 1603–1613. <https://doi.org/10.1007/s10803-014-2311-7>
- Robinson, P. D., Schutz, C. K., Macciardi, F., White, B. N., & Holden, J. J. A. (2001). Genetically determined low maternal serum dopamine beta-hydroxylase levels and the etiology of autism spectrum disorders. *American Journal of Medical Genetics*, 100(1), 30–36. <https://doi.org/10.1002/ajmg.1187>
- Rosenberg, A., Patterson, J. S., & Angelaki, D. E. (2015). A computational perspective on autism. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(30), 9158–9165. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510583112>
- Ruiz-Martinez, F. J., Rodriguez-Martinez, E. I., Wilson, C. E., Yau, S., Saldana, D., & Gomez, C. M. (2020). Impaired p1 habituation and mismatch negativity in children with autism spectrum disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 50(2), 603–616. <https://doi.org/10.1007/s10803-019-04299-0>
- Rutherford, M. D., Troubridge, E. K., & Walsh, J. (2012). Visual afterimages of emotional faces in high functioning autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 42(2), 221–229. <https://doi.org/10.1007/s10803-011-1233-x>
- Sapey-Triomphe, L. -A., Temmerman, J., Puts, N. A. J., & Wagemans, J. (2021). Prediction learning in adults with autism and its molecular correlates. *Molecular Autism*, 12(1), 64. <https://doi.org/10.1186/s13229-021-00470-6>
- Sapey-Triomphe, L. -A., Timmermans, L., & Wagemans, J. (2021). Priors bias perceptual decisions in autism, but are less flexibly adjusted to the context. *Autism Research*, 14(6), 1134–1146. <https://doi.org/10.1002/aur.2452>
- Sapey-Triomphe, L. -A., Weillhammer, V. A., & Wagemans, J. (2022). Associative learning under uncertainty in adults with autism: Intact learning of the cue-outcome contingency, but slower updating of priors. *Autism*, 26(5), 1216–1228. <https://doi.org/10.1177/13623613211045026>
- Sarafyazd, M., & Jazayeri, M. (2019). Hierarchical reasoning by neural circuits in the frontal cortex. *Science*, 364(6441), Article eaav8911. <https://doi.org/10.1126/science.aav8911>
- Schuerk, T., Sodian, B., & Paulus, M. (2016). Cognitive mechanisms underlying action prediction in children and adults with autism spectrum condition. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46(12), 3623–3639. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2899-x>
- Sciutti, A., Burr, D., Saracco, A., Sandini, G., & Gori, M. (2014). Development of context dependency in human space perception. *Experimental Brain Research*, 232(12), 3965–3976. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-4021-y>
- Seery, A., Tager-Flusberg, H., & Nelson, C. A. (2014). Event-related potentials to repeated speech in 9-month-old infants at risk for autism spectrum disorder. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 6, Article 43. <https://doi.org/10.1186/1866-1955-6-43>
- Sevgi, M., Diaconescu, A. O., Henco, L., Tittgemeyer, M., & Schilbach, L. (2019). Social bayes: Using bayesian modeling to study autistic trait-related differences in social cognition. *Biological Psychiatry*, 87(2), 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2019.09.032>
- Seymour, R. A., Rippon, G., Gooding-Williams, G., Schoffelen, J. M., & Kessler, K. (2019). Dysregulated oscillatory connectivity in the visual system in autism spectrum disorder. *Brain*, 142(10), 3294–3305. <https://doi.org/10.1093/brain/awz214>
- Sheppard, E., van Loon, E., Underwood, G., & Ropar, D. (2016). Difficulties predicting time-to-arrival in individuals with autism spectrum disorders. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 28, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2016.05.001>
- Shi, Z., Theisinger, L. A., Allenmark, F., Pistorius, R. L., Müller, H. J., & Falter-Wagner, C. M. (2022). Predictive coding in ASD: Inflexible weighting of prediction errors when switching from stable to volatile environments. *BioRxiv*, 2022.2001.2021.477218. <https://doi.org/10.1101/2022.01.21.477218>
- Shipp, S., Adams, R. A., & Friston, K. J. (2013). Reflections on agranular architecture: Predictive coding in the motor cortex. *Trends in Neurosciences*, 36(12), 706–716. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.09.004>
- Sinha, P., Kjelgaard, M. M., Gandhi, T. K., Tsourides, K., Cardinaux, A. L., Pantazis, D., ... 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>
- Skewes, J. C., Jegindo, E. M., & Gebauer, L. (2015). Perceptual inference and autistic traits. *Autism*, 19(3), 301–307. <https://doi.org/10.1177/136236131519872>
- Sterzer, P., Adams, R. A., Fletcher, P., Frith, C., Lawrie, S. M., Muckli, L., ... Corlett, P. R. (2018). The predictive coding account of psychosis. *Biological Psychiatry*, 84(9), 634–643. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2018.05.015>
- Stevenson, R. A., Toulmin, J. K., Youm, A., Besney, R. M. A., Schulz, S. E., Barense, M. D., & Ferber, S. (2017). Increases in the autistic trait of attention to detail are associated with decreased multisensory temporal adaptation. *Scientific Reports*, 7, Article 14354. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14632-1>
- Stoodley, C. J., & Tsai, P. T. (2021). Adaptive prediction for social contexts: The cerebellar contribution to typical and

- atypical social behaviors. In B. Roska & H. Y. Zoghbi (Eds.), *Annual Review of Neuroscience*, 44, 2021 (Vol. 44, pp. 475–493). <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-100120-092143>
- Tam, F. I., King, J. A., Geisler, D., Korb, F. M., Sareng, J., Ritschel, F., ... Ehrlich, S. (2017). Altered behavioral and amygdala habituation in high-functioning adults with autism spectrum disorder: An fMRI study. *Scientific Reports*, 7, Article 13611. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14097-2>
- Teinonen, T., Fellman, V., Naatanen, R., Alku, P., & Huotilainen, M. (2009). Statistical language learning in neonates revealed by event-related brain potentials. *BMC Neuroscience*, 10, Article 21. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-10-21>
- Teufel, C., & Fletcher, P. C. (2020). Forms of prediction in the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience*, 21(5), 297–297. <https://doi.org/10.1038/s41583-020-0296-0>
- Tewolde, F. G., Bishop, D. V. M., & Manning, C. (2018). Visual motion prediction and verbal false memory performance in autistic children. *Autism Research*, 11(3), 509–518. <https://doi.org/10.1002/aur.1915>
- Thillay, A., Lemaire, M., Roux, S., Houy-Durand, E., Barthelemy, C., Knight, R. T., ... Bonnet-Brilhaut, F. (2016). Atypical brain mechanisms of prediction according to uncertainty in autism. *Frontiers in Neuroscience*, 10, 317. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00317>
- Turi, M., Burr, D. C., Iglizzi, R., Aagten-Murphy, D., Muratori, F., & Pellicano, E. (2015). Children with autism spectrum disorder show reduced adaptation to number. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(25), 7868–7872. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504099112>
- Turi, M., Karaminis, T., Pellicano, E., & Burr, D. (2016). No rapid audiovisual recalibration in adults on the autism spectrum. *Scientific Reports*, 6, Article 21756. <https://doi.org/10.1038/srep21756>
- Utzerath, C., Schmits, I. C., Buitelaar, J., & de Lange, F. P. (2018). Adolescents with autism show typical fMRI repetition suppression, but atypical surprise response. *Cortex*, 109, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.08.019>
- van Boxtel, J. J. A., Dapretto, M., & Lu, H. J. (2016). Intact recognition, but attenuated adaptation, for biological motion in youth with autism spectrum disorder. *Autism Research*, 9(10), 1103–1113. <https://doi.org/10.1002/aur.1595>
- 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 Laarhoven, T., Stekelenburg, J. J., Eussen, M., & Vroomen, J. (2019). Electrophysiological alterations in motor-auditory predictive coding in autism spectrum disorder. *Autism Research*, 12(4), 589–599. <https://doi.org/10.1002/aur.2087>
- van Laarhoven, T., Stekelenburg, J. J., Eussen, M., & Vroomen, J. (2020). Atypical visual-auditory predictive coding in autism spectrum disorder: Electrophysiological evidence from stimulus omissions. *Autism*, 24(7), 1849–1859, Article 1362361320926061. <https://doi.org/10.1177/1362361320926061>
- Vivanti, G., Hocking, D. R., Fanning, P. A. J., Uljarevic, M., Postorino, V., Mazzone, L., & Dissanayake, C. (2018). Attention to novelty versus repetition: Contrasting habituation profiles in autism and Williams syndrome. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 29, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.01.006>
- von der Luhe, T., Manera, V., Barisic, I., Becchio, C., Vogeley, K., & Schilbach, L. (2016). Interpersonal predictive coding, not action perception, is impaired in autism. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Science*, 371(1693). <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0373>
- Westerfield, M. A., Zinni, M., Vo, K., & Townsend, J. (2015). Tracking the sensory environment: An ERP study of probability and context updating in ASD. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 45(2), 600–611. <https://doi.org/10.1007/s10803-014-2045-6>
- Wolpe, N., Ingram, J. N., Tsvetanov, K. A., Geerligs, L., Kievit, R. A., Henson, R. N., ... Cam, C. A. N. (2016). Ageing increases reliance on sensorimotor prediction through structural and functional differences in frontostriatal circuits. *Nature Communications*, 7, Article 13034. <https://doi.org/10.1038/ncomms13034>
- Yu, A. J., & Dayan, P. (2005). Uncertainty, neuromodulation, and attention. *Neuron*, 46(4), 681–692. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.04.026>
- Zhou, P., Zhan, L., & Ma, H. (2019). Predictive language processing in preschool children with autism spectrum disorder: An eye-tracking study. *Journal of Psycholinguistic Research*, 48(2), 431–452. <https://doi.org/10.1007/s10936-018-9612-5>

Predictive coding deficits in autism: Abnormalities in feedback or feedforward connectivities?

JING Wei¹, CHEN Qi¹, XUE Yun Qing¹, YANG Miao², ZHANG Jie²

(¹ College of Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

(² Xi'an Children's Hospital, Xi'an 710002, China)

Abstract: Based on predictive coding theories, researchers have proposed that prediction deficits underlie the multi-domain deficits in perceptual-motor, cognitive-learning, and social-verbal domains in individuals with autism spectrum disorder (ASD), i.e., the Predictive Impairment in Autism (PIA) hypothesis. In PIA, researchers have proposed these hypotheses of “Hypo-Prior” and “High and Inflexible Precision of Prediction Errors in Autism” based on Bayesian and hierarchical inferences. However, there is no consistent evidence in favor of these hypotheses. The relative weights of different priors in different domains are not universally reduced but have a wide range of task or context sensitivity in ASD. The literature provides mixed results regarding whether individuals with ASD can modulate prediction error precision based on environmental volatilities. In addition, there is inconclusive information about the underlying mechanism, whether it is an abnormality in bottom-up feedforward connectivity due to alterations in the neuromodulatory systems or impairment in top-down feedback connectivity due to alterations in the functioning of predictive brain regions. Although the theory provides a credible and unified explanatory framework for ASD, it needs more research evidence for revision and refinement to guide early screening, diagnosis, treatment, and educational practices for ASD.

Keywords: autism spectrum disorder, predictive coding, prior prediction, sensory input, feedforward/feedback connectivity