

DISS. ETH NO. 29744

**COGNITIVE AND NEURAL BASES OF
INTUITIVE PHYSICAL INFERENCE**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

GABRIELLE AUDE ZBÄREN

M.Sc. in Neural Systems and Computation, University of Zurich and ETH Zurich

M.Res. in Cognitive Neuroscience, University College London

born on 12.07.1992.

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Nicole Wenderoth

Prof. Dr. Manu Kapur

Prof. Dr. Nora Raschle

Dr. Sarah Meissner

2023

Abstract

Humans possess an intuitive understanding of the environment's physical properties and dynamics, which enables them to predict the outcomes of physical scenarios and successfully interact with the physical world. Despite the importance of physical inferences in daily life, our understanding of how humans carry them out remains limited. Moreover, while these inferences are generally reliable, they can sometimes be erroneous. The overarching aim of this thesis was to gain a better understanding of human physical inference by investigating its cognitive and neural bases. This thesis presents two lines of research: The first study examines errors that arise during physical inference, while the second and third studies investigate the neural underpinnings of intuitive physical inference.

In the first study, we designed an intuitive physical inference task requiring participants to infer the parabolic trajectory of an occluded ball falling under Newtonian physics, from various heights and with various horizontal velocities. We show that more than half of the participants mistakenly predicted the ball to fall straight down – a misconception likely stemming from reliance on erroneous physical principles. We further show that the other participants, who correctly predicted the ball to fall forward, exhibited a bias in that they predicted shorter fall times with higher horizontal velocities. Using a modelling framework for studying magnitude estimation based on Bayesian inference, we show that this bias may be explained by general perceptual processing mechanisms, while relying on a correct model of physics to estimate physical outcomes.

In the second study, we investigated the neural representations associated with the inference of occluded projectile motion. Participants were first trained on the physical inference task used in the first study by receiving feedback on their performance. This was followed by an fMRI session during which they first performed the physical inference task alternately with a visually matched control task, and then passively observed balls falling parabolically. We showed that solving the physical inference task engages early visual regions, together with a frontoparietal network. A multivariate pattern analysis revealed that these regions represent trajectory-specific information, despite the absence of visual inputs. Moreover, in early visual areas, these trajectory-specific representations resemble those evoked by the perception of falling balls. These findings suggest that physical inferences are accompanied by visual imagery of the inferred scene.

In the third study, we build upon the findings from the previous study, with the aim to characterise connectivity patterns among brain regions engaged in physical inference and whose activity is linked to early visual processing when inferring occluded projectile motion. We found that early visual areas are functionally connected to a set of parietal and premotor regions when inferring occluded trajectories. Using dynamic causal modelling, we show that during inference, internally generated early visual activity is modulated by the supramarginal gyrus and, in turn, modulates the superior parietal lobule. These findings provide additional support for the involvement of early visual areas in intuitive physical inference.

Together, these results contribute to our understanding of how humans intuitively draw physical inferences, and of how inferred physical scenarios are represented in the brain. By providing new insights into the involvement of early visual areas, this thesis opens up new avenues for future research into the link between visual imagery and physical inference abilities.

Résumé

Les êtres humains possèdent une compréhension intuitive des propriétés et dynamiques physiques de l'environnement, ce qui leur permet de prédire les résultats de scénarios physiques et d'interagir avec succès avec le monde physique. Malgré l'importance des inférences physiques dans la vie quotidienne, notre compréhension de la manière dont les humains les réalisent reste limitée. De plus, bien que ces inférences soient généralement fiables, elles peuvent parfois être erronées. L'objectif principal de cette thèse est de mieux comprendre l'inférence physique humaine en étudiant ses bases cognitives et neuronales. Cette thèse présente deux lignes de recherche: la première étude porte sur les erreurs qui surviennent lors de l'inférence physique, tandis que les deuxième et troisième études visent à examiner les bases neurales de l'inférence physique intuitive.

Dans la première étude, nous avons conçu une tâche d'inférence physique intuitive demandant aux participants/tes d'inférer la trajectoire parabolique d'une balle occultée soumise à la physique newtonienne, chutant à partir de différentes hauteurs et avec différentes vitesses horizontales. Nous montrons que plus de la moitié des participants/tes ont prédit à tort que la balle tombe en ligne droite, une erreur probablement due au fait qu'ils/elles s'appuient sur des principes physiques erronés. Nous montrons en outre que les autres participants/tes, ayant correctement prédit que la balle tombe vers l'avant, présentaient un biais en ce qu'ils/elles prédisaient des temps de chute plus courts avec des vitesses horizontales plus élevées. En utilisant un cadre de modélisation pour étudier l'estimation des magnitudes basée sur l'inférence bayésienne, nous montrons que ce biais pourrait être expliqué par des mécanismes généraux relatif au traitement perceptif, tout en s'appuyant sur un modèle correct de la physique afin d'inférer la trajectoire.

Dans la seconde étude, nous avons étudié les représentations neuronales associées à l'inférence du mouvement de projectiles occultés. Les participants/tes ont d'abord été entraînés/ées à la tâche d'inférence physique utilisée dans la première étude, en recevant un retour sur leur performance. Ils/elles ont ensuite été soumis/e à une séance d'IRMf au cours de laquelle ils/elles ont d'abord exécuté la tâche d'inférence physique en alternance avec une tâche de contrôle visuellement identique, puis ont observé passivement des balles tombant de manière parabolique. Nous avons montré que la résolution de la tâche d'inférence physique mobilise les aires visuelles primaires, ainsi qu'un réseau frontopariétal. Une analyse multivariée a révélé

que ces régions représentent des informations spécifiques à la trajectoire de la balle, malgré l'absence d'input visuel. De plus, dans les aires visuelles précoces, ces représentations ressemblent à celles évoquées par l'observation de balles qui tombent. Ces résultats suggèrent que les inférences physiques sont accompagnées d'imagerie visuelle de la scène inférée.

Dans la troisième étude, nous nous appuyons sur les résultats de l'étude précédente, dans le but de caractériser les patterns de connectivité entre les régions cérébrales impliquées dans l'inférence physique et dont l'activité est liée au traitement visuel dans les aires précoces lors de l'inférence du mouvement de projectiles occultés. Nous avons constaté que les aires visuelles précoces sont fonctionnellement connectées à un ensemble de régions pariétales et prémotrices lors de l'inférence de trajectoires occultées. En utilisant la modélisation causale dynamique, nous montrons que pendant l'inférence, l'activité visuelle précoce générée internement est modulée par le gyrus supramarginal et, à son tour, module le lobule pariétal supérieur. Ces résultats apportent un soutien supplémentaire à l'implication des aires visuelles précoces dans l'inférence physique intuitive.

Dans l'ensemble, ces résultats contribuent à notre compréhension de la manière dont les humains réalisent intuitivement des inférences physiques, et dont les scénarios physiques inférés sont représentés dans le cerveau. En apportant de nouvelles informations sur l'implication des aires visuelles précoces, cette thèse ouvre de nouvelles perspectives pour de futures recherches sur le lien entre l'imagerie visuelle et les capacités d'inférence physique.