

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento di Psicologia Generale**

**Corso di Laurea Magistrale in Psicologia Cognitiva Applicata**

**Tesi di Laurea Magistrale**

**Percezione di causalità nelle collisioni: tre modelli a confronto**

*Perception of causality in collisions: three models compared*

*Relatore:*

**Prof. Michele Vicovaro**

*Laureando:* **Davide Zorzan**

*Matricola:* **1205080**

**ANNO ACCADEMICO**

**2021/2022**



*A mia mamma e mio papà,  
per avermi sostenuto lungo il mio percorso.  
E a Bibiana,  
per il supporto dato nei momenti di difficoltà  
e per aver creduto in me,  
anche nei momenti in cui io ho smesso di farlo.*

*Un particolare ringraziamento al Professor Michele Vicovaro, per avermi fatto prendere parte  
alla realizzazione di questo progetto, per gli importanti consigli e insegnamenti e per la  
passione che trasmette attraverso il suo lavoro.*



## INDICE

<b>PREMESSA</b>	1
<b>CAP. 1 - Prospettive teoriche sulla percezione di causalità nelle collisioni orizzontali</b>	3
○ <b>1.1 Albert Michotte: causalità come percezione visiva</b>	3
○ 1.1.1 Launching effect: il punto di partenza	4
○ 1.1.2 L'eredità di Albert Michotte	7
○ 1.1.3 Eventi dinamici: proprietà cinetica e proprietà dinamiche	9
○ <b>1.2 Fisica ingenua delle collisioni orizzontali</b>	11
○ 1.2.1 Modelli euristici	12
○ 1.2.2 Modelli Bayesiani	15
<b>CAP.2 - Progetto di ricerca e definizione dei modelli di riferimento</b>	19
○ <b>2.1 Fisica delle collisioni orizzontali</b>	20
○ 2.1.1 Coefficiente di restituzione: un concetto chiave	21
○ <b>2.2 Tre modelli di riferimento: <i>the Newtonian observer, the heuristic observer, the Michottean observer</i></b>	24
○ 2.2.1 <i>The Newtonian observer</i>	25
○ 2.2.2 <i>The heuristic observer</i>	27
○ 2.2.3 <i>The Michottean observer</i>	29
○ <b>2.3 Modello di stima della manica</b>	32

<b>CAP.3 - Tre esperimenti sulle collisioni: naturalezza, causalità di <math>A</math> su <math>B</math>, causalità di <math>B</math> su <math>A</math></b>	<b>35</b>
○ <b>3.1</b> Esperimenti sul giudizio di naturalezza e causalità: gli obiettivi	35
○ 3.1.1 Partecipanti esperimento sulla naturalezza	36
○ 3.1.2 Partecipanti esperimento di causalità di $A$ su $B$	36
○ 3.1.3 Partecipanti esperimento di causalità di $B$ su $A$	37
○ <b>3.2</b> Design degli stimoli	37
○ <b>3.3</b> Procedura sperimentale	40
○ <b>3.4</b> Risultati	43
○ 3.4.1 Livello d'accordo tra i soggetti e i tre modelli di riferimento	43
○ 3.4.2 Effetti del rapporto di massa, della velocità pre-collisione di $A$ , e del coefficiente di restituzione $C$ sulla performance del modello Newtoniano	50
<b>CAP.4 - Discussione e conclusioni</b>	<b>63</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>69</b>

## PREMESSA

L'argomento principale trattato in questa tesi è la percezione visiva degli eventi dinamici, in particolare delle collisioni orizzontali. Un argomento a lungo studiato dalla Psicologia Sperimentale, a partire dal lavoro portato avanti da Albert Michotte (1881 - 1965) sulla causalità fenomenica.

Verrà presentato un progetto di ricerca articolato in tre esperimenti sulle collisioni orizzontali. Lo scopo principale della ricerca è quello di testare la bontà di tre modelli, costruiti sulla base delle principali prospettive teoriche sulla percezione degli eventi dinamici, nel formulare previsioni circa i giudizi dei soggetti sulla naturalezza e causalità delle collisioni orizzontali.

Il primo capitolo offre una rassegna teorica sulla percezione degli eventi dinamici e la sua evoluzione nel tempo. Partendo dai lavori di Michotte sulla percezione di causalità e il suo famoso stimolo che genera l'impressione visiva denominata *launching effect*, per arrivare alla più recente prospettiva sulla fisica ingenua che comprende i modelli euristici secondo i quali la conoscenza delle persone riguardo il mondo fisico è basata su euristiche che non corrispondono alle leggi della fisica newtoniana, ed i modelli bayesiani secondo i quali le conoscenze implicite sulla fisica si basano su l'interiorizzazione delle leggi fisiche stesse.

Nel secondo capitolo verranno presentati i concetti fisici legati alle collisioni orizzontali ed i tre modelli di riferimento utilizzati nel progetto di ricerca,

parlando della loro costruzione e spiegando su cosa si basano le loro previsioni riguardo i giudizi dei soggetti.

Nel terzo capitolo verrà presentato il progetto di ricerca nella sua interezza, ed infine nel quarto capitolo ne verranno discussi i risultati.



# CAPITOLO 1

## **Prospettive teoriche sulla percezione di causalità nelle collisioni orizzontali**

### ***1.1 Albert Michotte: causalità come percezione visiva***

Lo psicologo belga Albert Michotte (1881-1965), nato a Bruxelles nel 1881, è stato uno dei primi ad addentrarsi nello studio sperimentale degli eventi dinamici dal punto di vista psicologico e percettivo. Prima di lui, la tradizione filosofica empirista (in special modo Hume) sosteneva che gli eventi dinamici vengono percepiti come una sequenza di movimenti indipendenti tra loro, sui quali la mente interverrebbe in uno stadio più avanzato per unire tali movimenti secondo relazioni di causa-effetto, creando così una rappresentazione del mondo che ci circonda e in cui siamo immersi.

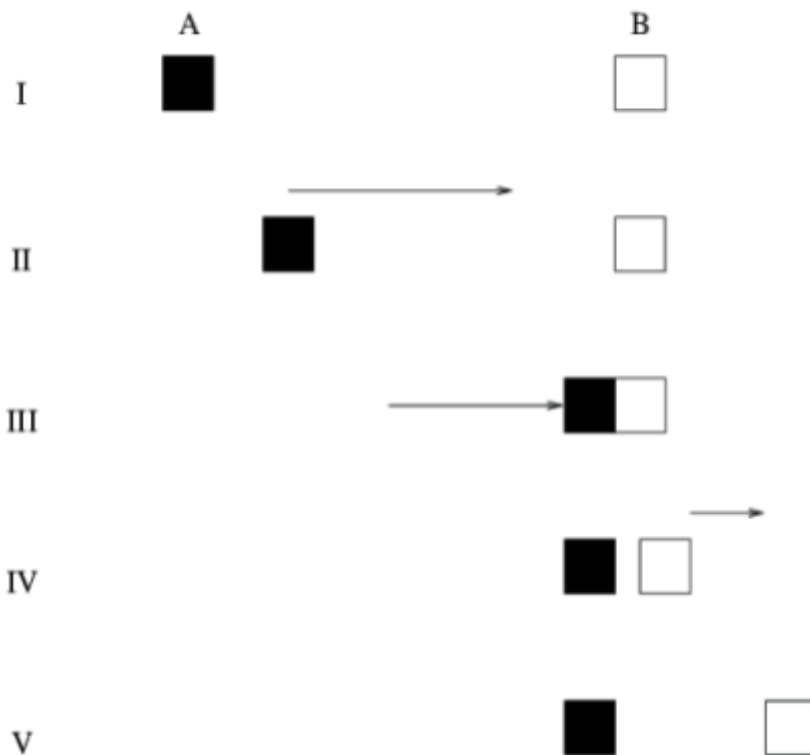
Alcuni psicologi gestaltisti come Köhler e Duncker hanno ipotizzato che le relazioni di tipo causale potessero essere percepite direttamente nel sistema visivo senza l'ausilio di processi cognitivi superiori. Tale ipotesi è stata formulata prima degli studi di Michotte, tuttavia egli è stato il primo a fornire dei risultati empirici convincenti per contrastare quanto era stato sostenuto fino ad allora riguardo la percezione degli eventi dinamici e delle relazioni causali ad essi connesse. Nel campo della percezione della causalità, Michotte rimane una delle figure di spicco nella psicologia del ventesimo secolo. Le sue ricerche

hanno resistito al segno del tempo e continuano tuttora ad ispirare i lavori che trattano la percezione degli eventi dinamici.

Nel suo libro più famoso, *La perception de la causalité* (1946/1954/1963), egli si oppone con forza alla visione secondo la quale il sistema visivo percepisce gli eventi dinamici come un insieme di movimenti separati tra loro. Al contrario, sostiene che chi osserva un evento dinamico lo percepisce come una sequenza unica in cui gli elementi sono uniti da relazioni di causa ed effetto, senza l'intervento di processi cognitivi superiori, esperienze pregresse o interpretazione cosciente. Michotte dimostra che anche concetti che possono sembrare "di alto livello" come la causalità, possono avere origine direttamente nel sistema visivo (Wagemans, van Lier, & Scholl, 2006). Questo sposta l'attenzione sulla pura percezione, piuttosto che sul ruolo dell'esperienza e dell'apprendimento per quanto concerne gli eventi dinamici.

### **1.1.1 Launching Effect: il punto di partenza**

Nel suo esperimento più famoso, Michotte (1963) mostra ai soggetti due piccoli quadrati allineati su un'asse orizzontale (vedi Figura 1). Ad un certo punto il quadrato più a sinistra (denominato *A*) inizia a muoversi verso il secondo quadrato (denominato *B*), il quale è inizialmente stazionario. Appena avviene il contatto tra *A* e *B*, quest'ultimo inizia a muoversi nella stessa direzione e con la stessa velocità con cui inizialmente si muoveva *A*, e contemporaneamente *A* si ferma.



**Figura 1.** Un esempio dello stimolo utilizzato da Michotte negli esperimenti sul launching effect

L'impressione visiva generata dallo stimolo che il moto di *B* venga causato dalla collisione con *A*, viene chiamato *Launching Effect* ( Effetto lancio in italiano)

La situazione-stimolo descritta in Figura 1 ha permesso per la prima volta di studiare la causalità fenomenica in un contesto di laboratorio, ed allo stesso tempo di dimostrare che l'impressione di causalità può avere origine anche da stimoli astratti, sottolineando come la causalità fisica e la causalità fenomenica siano concetti che sottostanno a regole diverse.

Nel suo lavoro, Michotte (1963) riporta più di 100 studi, la maggior parte dei quali riguardanti il launching effect. Le condizioni-stimolo che danno origine alla percezione del launching effect sono state studiate da Michotte nei minimi dettagli. Numerose variazioni dello stimolo mostrato in Figura 1, sono state ottenute modificandone alcuni dettagli, come la tipologia di movimento, i rapporti di velocità, grandezza, colore e forma degli oggetti. Questa raffinata indagine sperimentale consente a Michotte di sviluppare una teoria della percezione della causalità che mette in evidenza la sua natura automatica e immune da credenze e processi di alto livello.

La teoria Michottiana della causalità si fonda su principi gestaltici: la percezione della causalità (i.e., *A* colpisce *B*, che si muove per effetto di *A*) avviene quando la scena viene percepita dall'osservatore come un movimento unico che parte da *A* e passa a *B*. Quanto appena descritto viene detto *ampliation of movement*, che secondo Michotte è la condizione sufficiente e necessaria affinché avvenga la percezione della causalità all'interno di un evento dinamico. È qui che una prima critica può essere mossa nei confronti del lavoro di Michotte: la discriminante tra quello che può essere considerato un evento dinamico percepibile o non percepibile è la presenza dell'*ampliation of movement*. Questa rigida interpretazione teorica porta Michotte a restringere il range di eventi dinamici percepibili, negando che possa esserci una percezione diretta di causalità in tipologie di eventi che non sono caratterizzati da *ampliation of movement*.

### **1.1.2 L'eredità di Albert Michotte**

Se da un lato quanto scoperto dallo psicologo belga nei suoi lavori è senza dubbio criticabile sotto alcuni aspetti, è ancor più chiaro quanto dall'altro lato i suoi lavori abbiano portato una ventata di aria fresca ed innovazione nello studio della percezione della causalità, il cui riflesso è ancora presente nelle moderne ricerche sulla percezione di causalità. Il modo in cui Michotte intende la causalità è stato fortemente innovativo dal punto di vista teorico, infatti l'idea che la causalità sia situata in un processo visivo automatico andava in netto contrasto con quanto teorizzato dal filosofo scozzese Hume, secondo il quale ciò che l'essere umano sa riguardo le nozioni di causa ed effetto deriva esclusivamente dalla correlazioni notate a seguito di esperienze ripetute di determinati eventi. Secondo tale prospettiva, la causalità si baserebbe quindi sull'apprendimento e non sulla percezione visiva.

Prima di Michotte, la causalità era trattata come un concetto cognitivo di livello superiore e non era perciò contemplata l'idea che la percezione, considerata invece solo per processi di basso livello, potesse giocare un ruolo nella determinazione delle relazioni causali. Oggi difficilmente si potrebbe obiettare al fatto che un fenomeno come la causalità possa essere elaborato direttamente nel sistema visivo. Il lavoro di Michotte inoltre ha contribuito a modificare l'idea su quello che si pensava essere la funzione della percezione: tale funzione non è più limitata alla sola ricostruzione del "mondo esterno" attraverso i sensi, ma si estende alla costruzione di nessi causali tra eventi.

Oltre all'eredità teorica non può essere dimenticato che il lavoro di Michotte ha lasciato un'importante eredità sul piano metodologico. Gli studi da lui condotti sono stati incredibilmente innovativi dal punto di vista metodologico, soprattutto per il fatto di essere stato in grado di costruire un apparato sperimentale che consentisse di presentare stimoli animati agli osservatori, in un'epoca nella quale non esistevano i computer. È grazie a questo apparato che Michotte riesce a mostrare come un fenomeno percettivo possa essere identificato, misurato e dimostrato in un esperimento di laboratorio. La semplicità e allo stesso tempo la funzionalità dello stimolo del launching effect come apparato per studiare gli eventi dinamici unito al tutt'ora aperto dibattito riguardo la percezioni della causalità sono i motivi che hanno spinto i ricercatori venuti dopo Michotte a portare avanti numerosi esperimenti, ampliando così la conoscenza riguardante tali argomenti.

### **1.1.3 Eventi dinamici: proprietà cinetiche e proprietà dinamiche**

Un modo utilizzato per migliorare ed aumentare le conoscenze per quanto concerne gli eventi dinamici è stato reso possibile dall'avanzamento tecnologico. L'utilizzo della computer grafica permette di simulare una maggiore complessità degli stimoli utilizzati in laboratorio così da renderli più simili agli eventi dinamici che si incontrano nella quotidianità, caratterizzati da una complessità maggiore.

A questo punto è utile porre una divisione tra le proprietà degli oggetti coinvolti nello stimolo del launching effect: la distinzione che possiamo fare è tra proprietà cinetiche e proprietà dinamiche.

Le proprietà cinetiche si riferiscono allo spostamento degli oggetti nello spazio in un certo lasso di tempo, quindi al loro movimento; le proprietà dinamiche si riferiscono alla massa, all'energia e alla forza. Dal punto di vista fisico è palese quanto le proprietà dinamiche siano di primaria importanza nel movimento degli oggetti: lo scambio di energia può essere identificato come la causa del movimento di un oggetto, e la quantità di moto e la forza dipendono direttamente dalla massa dell'oggetto. Secondo quanto postulato da Michotte nel modello dell'ampliation of movement, la percezione di causalità avviene nel momento in cui nella scena si presenta come un unico movimento trasmesso da un oggetto all'altro. In altre parole, la percezione degli eventi dinamici e la percezione delle relazioni causali ad essi collegate avvengono unicamente sulla base delle proprietà cinetiche dello stimolo. Al contrario, le proprietà dinamiche degli oggetti quali la massa non giocherebbero alcun ruolo di rilievo. Tali proprietà verrebbero considerate come superficiali e di conseguenza non influenzerebbero la percezione dell'evento dinamico (White, 2006a). Questa idea si collega all'idea più generale secondo la quale le proprietà cinetiche come la velocità possono essere percepite direttamente dal sistema visivo, mentre proprietà dinamiche come la massa al contrario non possono essere percepite visivamente (Runeson, 1983).

Le evidenze che hanno portato a concludere che le proprietà dinamiche non sono necessarie per la percezione di causalità derivano da esperimenti in cui gli stimoli utilizzati sono astratti. Tuttavia, l'idea che le proprietà dinamiche degli stimoli non giochino alcun ruolo nella percezione della causalità è stata messa in discussione dagli studi condotti utilizzando stimoli più realistici, come sfere virtuali caratterizzate da specifici materiali simulati, quali legno, ferro, o plastilina (e.g., Vicovaro 2012, 2018; Vicovaro & Burigana, 2014, 2016). In diretto contrasto con quanto sostenuto da Michotte, il modello *kinematic specification of dynamics (KSD)* di Runeson e Frykholm (1983) sostiene che il sistema visivo possa percepire la massa relativa degli oggetti coinvolti in eventi dinamici. Secondo il *KSD*, in una collisione tra due oggetti *A* e *B*, il sistema visivo può percepire il rapporto tra le loro masse basandosi sulla relazione tra le velocità pre- e post-collisione. Tale operazione avviene secondo questa formula:

$$m_a/m_b = (u_b - v_b) / (v_a - u_a)$$

In questa formula  $m_a$  e  $m_b$  sono le masse degli oggetti *A* e *B*,  $u_a$  e  $u_b$  sono le velocità pre-collisione di *A* e *B*, mentre  $v_a$  e  $v_b$  sono le velocità post-collisione di *A* e *B*. Secondo il modello i soggetti sono in grado di cogliere il rapporto tra le masse direttamente dal sistema visivo. Il *KSD* rimane quindi all'interno della prospettiva della percezione diretta, tuttavia alcuni studi hanno mostrato come le prestazioni nella stima dei rapporti di massa in eventi di



collisione migliorano con l'aumentare delle prove. La percezione della massa derivata dalle proprietà cinetiche è un'abilità che deve essere imparata.

## **1.2 Fisica ingenua delle collisioni: Modelli euristici e Modelli bayesiani**

Il dibattito, precedentemente citato, tra la due prospettive incarnate rispettivamente da Michotte e Hume si presenta nuovamente: la causalità è percepita direttamente nel sistema visivo, oppure può essere colta solamente attraverso l'apprendimento e i processi cognitivi di ragionamento? La risposta non può essere univoca, sarebbe forse più corretto pensare a queste due prospettive come i poli di un continuum piuttosto che come visioni dicotomiche. Al contrario della prospettiva michottiana centrata sulla percezione visiva delle collisioni, la fisica ingenua tratta dei ragionamenti messi in atto dalle persone quando assistono ad un evento di collisione.

La fisica ingenua si può definire come un insieme di cognizione e percezione, tuttavia questo approccio si focalizza maggiormente sul lato cognitivo. L'obiettivo principale della disciplina è quello di indagare come le persone ragionano riguardo agli eventi fisici, e se le loro previsioni riguardo le collisioni seguono le leggi newtoniane della meccanica.

### 1.2.1 Modelli euristici

Negli anni '80 e '90 prende forza la concezione secondo la quale la conoscenza delle persone riguardo il mondo fisico sia basata su euristiche che non corrispondono alle leggi della fisica newtoniana (diSessa, 1993; McCloskey, 1983). L'utilizzo di tali scorciatoie mentali sarebbe dovuto alle scarse risorse del sistema cognitivo. Le difficoltà nel fare previsioni riguardo gli eventi fisici sarebbero dovute all'incapacità nell'integrazione di diverse informazioni, che porterebbe le persone a concentrarsi unicamente sulle variabili più salienti. Alcune delle evidenze a favore della concezione euristica arrivano dai compiti che prevedono il giudizio della massa degli oggetti nelle collisioni da parte dei soggetti: secondo la fisica newtoniana, se sono note le velocità pre- e post- collisione, l'oggetto con la massa maggiore è quello con la minor differenza tra la velocità iniziale e quella finale. I soggetti che devono svolgere questo compito, tuttavia danno importanza a informazioni irrilevanti per trarre conclusioni, cadendo in bias che identificano come oggetto più pesante quello con la velocità pre-collisione maggiore (Andersson & Runeson, 2008; A. L. Cohen & Ross, 2009; Gilden & Proffitt, 1989; Runeson et al., 2000; Runeson & Vedeler, 1993; Todd & Warren, 1982).

Il movimento degli oggetti nelle collisioni è vincolato ai principi della meccanica newtoniana, le tre leggi di Newton stabiliscono che: se la somma delle forze che agiscono su di un oggetto è pari a zero allora l'oggetto rimane in stato di quiete o di moto rettilineo uniforme (*principio di inerzia*); il cambiamento

di moto è proporzionale alla forza motrice applicata, e avviene lungo la linea retta secondo cui la forza stessa è esercitata (*principio di proporzionalità*); ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria, ovvero quando *A* esercita una forza su *B*, l'oggetto *B* esercita su *A* una forza di uguale intensità in direzione opposta (*principio di azione e reazione*).

Le previsioni delle persone riguardo agli eventi fisici corrispondono alle leggi newtoniane solamente quando gli scenari sono molto semplici, nel caso delle collisioni il numero di elementi da valutare rende il contesto troppo complesso per essere analizzato correttamente, questo porta le persone ad affidarsi alle euristiche. Una buona parte delle ricerche che trattano le euristiche utilizzate dagli esseri umani nell'elaborare gli eventi fisici sono centrate sui compiti di giudizio delle collisioni tra oggetti. Secondo McCloskey (1983) le previsioni riguardo il moto degli oggetti sono guidate dall'euristica della trasmissione dell'impeto, basata sulla teoria medievale dell'*impetus* secondo la quale l'azione di mettere un oggetto in movimento trasmette all'oggetto stesso un *impetus* (una sorta di forza interna) che gli permette di mantenere il moto e che viene dissipato nel tempo.

Altri studi hanno dimostrato lo scostamento dei giudizi da parte dei soggetti rispetto a quanto postulato dai principi Newtoniani. Questi studi mostrano come i giudizi di causalità non siano determinati esclusivamente dalle proprietà fisiche dell'evento; nel caso di un oggetto in movimento che si scontra con un altro oggetto inizialmente fermo, i soggetti riportano un'impressione di

causalità maggiore quando l'effetto dell'oggetto in movimento sull'oggetto stazionario è minore; in una collisione tra due oggetti con la stessa massa i soggetti riportano che l'oggetto in movimento pesa più dell'oggetto stazionario, questo fenomeno prende il nome di *motor object bias*. Secondo Gilden e Proffitt (1989; 1991) nel giudizio delle collisioni vengono applicate due tipi di euristiche: l'oggetto con la velocità post-collisione maggiore è più leggero e nella collisione tra due oggetti quello che rimbalza è più leggero di quello che non rimbalza (Gilden, 1991; Gilden & Proffitt, 1989; Proffitt & Gilden, 1989). Secondo i modelli euristici gli errori delle persone nei compiti di previsione degli eventi fisici derivano da bias cognitivi, le risposte dei partecipanti non si basano quindi sulle corrette conoscenze esplicite o implicite delle leggi fisiche, ma su processi cognitivi come l'esternalizzazione della dinamica corporea, che portano a deviazioni riguardo alle previsioni fisiche ( Vicovaro, 2021).

Quello che emerge dagli studi sulla fisica ingenua è che euristiche e bias intervengono nell'elaborazione degli eventi fisici soprattutto quando alle persone viene chiesta la spiegazione o la previsione di eventi fisici con i quali non hanno familiarità, o che sono rappresentati in modo estremamente schematico e irrealistico. Tali scostamenti dalla fisica sono attribuibili, nella maggior parte dei casi, alle credenze riconducibili alla teoria medievale dell'*impetus*.

### 1.2.2 Modelli Bayesiani

In tempi più recenti si è fatta spazio una concezione contraria a quella che vede le conoscenze sugli eventi fisici guidate dalle euristiche. Secondo la concezione da cui derivano i modelli bayesiani, le conoscenze implicite sulla fisica si basano su l'interiorizzazione delle leggi fisiche. Le conoscenze implicite sono quelle che non possono essere espresse tramite la verbalizzazione. Secondo questa concettualizzazione, le persone potrebbero non essere in grado di descrivere una legge fisica a parole, ma allo stesso tempo potrebbero avere una rappresentazione implicita accurata di quello che una determinata legge fisica rappresenta. È possibile avere una buona conoscenza implicita delle leggi della fisica anche senza riuscire a verbalizzarla. L'ipotesi alla base dell'internalizzazione delle leggi fisiche può essere ricondotta a Shepard (1984, 1994) che sostiene che, nel corso del loro sviluppo ontogenetico e filogenetico, gli esseri umani, hanno interiorizzato alcuni principi astratti di geometria. Partendo da tale idea, in tempi più recenti è stato teorizzato che, oltre a principi geometrici, gli esseri umani potrebbero aver interiorizzato le leggi della dinamica. Tali rappresentazioni interiorizzate guiderebbero la percezione del moto (vedi anche Vicovaro, 2021).

In uno studio del 2013, Sanborn et al. sottopongono ai partecipanti un compito in cui devono giudicare la naturalezza e la causalità di alcune collisioni: le risposte dei partecipanti corrispondevano alle previsioni fatte dal modello bayesiano *noisy Newton* che combina l'incertezza per quanto concerne le

variabili degli stimoli e i vincoli imposti dalle leggi newtoniane alla velocità post collisione degli oggetti. Il buon livello di coerenza tra le previsioni del modello e le risposte dei partecipanti supporta l'ipotesi che i giudizi dati nel compito siano guidati dall'interiorizzazione delle leggi fisiche. Le rappresentazioni interiorizzate delle leggi fisiche agirebbero in aiuto del sistema cognitivo quando le informazioni sensoriali sono incomplete o assenti (Vicovaro, 2021).

Le leggi della fisica sono concetti astratti e adattabili a vari tipi di contesti, invece le persone mostrano una buona conoscenza implicita delle leggi fisiche solo quando vengono esposte ad eventi familiari, questo perché l'internalizzazione delle leggi dipende dall'esperienza quotidiana con gli eventi fisici, tale processo avviene quindi grazie all'apprendimento derivato dalle esperienze con l'ambiente.

Il *noisy Newton model* si basa sull'inferenza Bayesiana, secondo tale modello le persone integrano gli input sensoriali rumorosi (i.e non chiari) con le credenze riguardo le variabili fisiche presenti in un dato evento dinamico. Andando più nel dettaglio, questo tipo di modello assume che le persone integrino gli input percettivi non chiari con le loro credenze pregresse sulle variabili fisiche e percettive che caratterizzano le situazioni. A livello cognitivo, le previsioni degli eventi di collisione verrebbero fatte simulando vari eventi fisici. Le conseguenze di tali eventi verrebbero elaborate applicando le leggi newtoniane alle variabili percettive e fisiche campionate attraverso gli input sensoriali. Le stime riguardanti le variabili percepibili visivamente, come la

velocità, verrebbero create combinando gli input sensoriali rumorosi con le conoscenze pregresse sulla regolarità statistica degli indizi percettivi dell'ambiente; i campioni di variabili non direttamente percepibili, come la massa, verrebbero creati attraverso l'inferenza da ripetute osservazioni o dalla conoscenza del mondo fisico.

L'approccio Bayesiano potrebbe offrire gli strumenti per comprendere come la conoscenza astratta guidi le inferenze sullo stato degli oggetti partendo dalle informazioni incomplete riguardo le variabili fisiche e percettive.

Il nucleo dei modelli costruiti sulla statistica bayesiana è l'idea che gli esseri umani costruiscano dei modelli mentali degli eventi fisici che permettono di fare inferenze riguardo agli eventi futuri grazie alla simulazione mentale (Kubricht et al., 2017). Secondo quanto dimostrato dagli studi sul ragionamento meccanico, il ragionamento degli esseri umani sugli eventi fisici avviene grazie alla rappresentazione spaziale, attraverso la quale risolvono le incertezze riguardo il comportamento degli oggetti. L'utilizzo della rappresentazione spaziale implica che il movimento degli oggetti e altri attributi fisici non direttamente percepibili siano codificati e rappresentati nella mente umana.





## CAPITOLO 2

### **Il progetto di ricerca e definizione dei modelli di riferimento**

Lo studio in questione tratta della causalità nelle collisioni orizzontali. In particolare, cerca di testare le bontà di tre diversi modelli che hanno lo scopo di prevedere i giudizi espliciti riguardo un evento dinamico di collisione.

Il progetto di ricerca si articola in tre esperimenti differenti, per i quali vengono utilizzati gli stessi stimoli presentati al computer: due quadrati neri (*A* e *B*), di dimensioni uguali. Inizialmente *B* è fermo, ad un certo punto *A* inizia a muoversi verso *B*, fino ad entrare in contatto con esso. La situazione-stimolo è sostanzialmente analoga a quella presentata in Figura 1, eccetto per il fatto che, dopo il contatto tra *A* e *B*, sia *A* che *B* possono muoversi (non solo *B* come nel classico stimolo lancio). Il compito dei partecipanti varia a seconda dell'esperimento. In un esperimento, il compito prevede che i partecipanti diano un giudizio sulla naturalezza della collisione; in un altro esperimento, i partecipanti devono giudicare se il movimento post-collisione del quadrato *B* è causato dall'impatto con il quadrato *A*; nell'ultima tipologia di esperimento, i partecipanti devono giudicare se il movimento post-collisione di *A* è causato dall'impatto con *B*.

## 2.1 Fisica delle collisioni orizzontali

Per poter indagare quanto i giudizi dei soggetti siano coerenti con le leggi newtoniane, è utile definire quali sono le formule e le variabili fisiche che governano la collisione. Secondo la fisica Newtoniana c'è una relazione fondamentale tra forza e movimento.

Le seguenti formule sono derivate dal principio della conservazione della quantità di moto e dal principio di conservazione dell'energia cinetica e vengono utilizzate per stabilire le velocità post-collisione dei quadrati  $A$  e  $B$  :

$$v_A = \frac{m_A u_A + m_B u_B + m_B C(u_B - u_A)}{m_A + m_B}$$
$$v_B = \frac{m_A u_A + m_B u_B + m_A C(u_A - u_B)}{m_A + m_B}$$

Dove  $v_A$  e  $v_B$  sono rispettivamente le velocità post-collisione di  $A$  e  $B$ , che vengono calcolate in funzione delle loro velocità pre-collisione  $u_A$  e  $u_B$ , delle loro masse  $m_A$  e  $m_B$  e del coefficiente di restituzione  $C$ , il quale rappresenta un concetto molto importante in questo progetto di ricerca. Velocità positive indicano un movimento post-collisione che va da sinistra verso destra, al contrario velocità negative indicano un movimento post-collisione che va da destra verso sinistra.

### 2.1.1 Coefficiente di restituzione $C$ : un parametro chiave

Il coefficiente di restituzione è un parametro che deriva dall'equazione sulla conservazione della quantità di moto e dell'energia cinetica, ed indica l'elasticità della collisione.

L'elasticità in una collisione si riferisce alla quantità di energia cinetica che viene conservata dopo la collisione di due oggetti,  $C$  viene determinato secondo la seguente equazione:

$$C = (v_B - v_A)/(u_A - u_B)$$

La meccanica newtoniana impone che  $0 \leq C \leq 1$ : non può essere maggiore di 1 in quanto significherebbe che l'energia cinetica post-collisione è più grande dell'energia cinetica pre-collisione, questo comporterebbe una violazione del principio di conservazione dell'energia; non può essere minore di 0 in quanto significherebbe una compenetrazione degli oggetti coinvolti nella collisione, impossibile per i corpi solidi. Un coefficiente di restituzione  $C = 1$  indica che l'energia presente nella collisione è interamente conservata, mentre un  $C < 1$  indica che una parte dell'energia cinetica è stata dissipata o convertita. Questo significa che, in una collisione coerente con le leggi della fisica, le velocità post-collisione di  $A$  e  $B$  devono essere comprese tra un minimo di 0 e un massimo uguale alle velocità pre-collisione di  $A$  e di  $B$  nel caso in cui i gli oggetti  $A$  e  $B$  abbiano la stessa massa.

L'importanza del coefficiente di restituzione nello stimare quanto i giudizi sulle collisioni siano in linea con le leggi newtoniane viene mostrata in uno studio di Twardy e Bingham (2002). In tale studio, veniva mostrata ai partecipanti un'animazione di una palla che cadendo rimbalzava più volte su di una superficie.

Il compito dei partecipanti era quello di giudicare la naturalezza del movimento della palla della quale veniva manipolato il coefficiente di restituzione. A livello visivo, tale manipolazione comportava una modifica dei parametri del rimbalzo, quali altezza relativa, velocità relativa, e periodo relativo. I risultati mostrano report di naturalezza relativamente alti per valori di  $C$  compresi tra 0 e 1, e report relativamente bassi per valori di  $C$  maggiori di 1, cioè fisicamente impossibili. Tali risultati suggeriscono che i giudizi sulla percezione di causalità siano basati sull'assunto che il valore di  $C$  possa variare solamente tra 0 e 1 (Sanborn et al., 2013). L'elasticità ha una grande influenza sul tipo di movimento che due oggetti hanno in seguito ad una collisione e l'elasticità è formalizzata nelle equazioni attraverso il parametro  $C$ , perciò per una data coppia di velocità pre-collisione, al diminuire dell'elasticità diminuisce il parametro  $C$ , al diminuire del parametro  $C$  diminuiscono le velocità post-collisione.

In un loro lavoro, Vicovaro e Burigana (2016) hanno studiato la comprensione intuitiva della relazione tra il coefficiente di restituzione e il pattern cinetico delle collisioni. Nel loro esperimento venivano presentate ai

partecipanti delle simulazioni di alcune collisioni simili all'effetto lancio, gli oggetti coinvolti nella collisione presentavano lo stesso materiale simulato (legno, polistirolo, e plastilina) e la stessa massa. In una collisione coerente con le leggi della fisica, il coefficiente di restituzione varia a seconda del materiale degli oggetti. Nell'esperimento, il coefficiente di restituzione simulato delle condizioni stimolo presentate assumeva un valore in un range che andava da 0 a 2, venivano quindi presentate sia collisioni fisicamente possibili che collisioni fisicamente impossibili.

Il compito dei partecipanti era quello di dare un giudizio di naturalezza sulle collisioni che venivano mostrate nelle situazioni-stimolo, attraverso il quale è stato possibile definire per ogni soggetto il *most natural coefficient of restitution* (*NC*) che viene definito come il valore implicito del coefficiente di restituzione che veniva percepito come più naturale per le collisioni con oggetti caratterizzati da uno specifico materiale simulato. Il passaggio chiave in questa ricerca si ha confrontando gli *NC* con i coefficienti di restituzione fisici (*PC*) che sono: .66 per gli oggetti di legno, .61 per gli oggetti di polistirolo, e .13 per gli oggetti di plastilina. I risultati mostrano che i partecipanti capiscono intuitivamente che le collisioni tra oggetti con maggior elasticità (*PC* più alto) come il legno e il polistirolo implicano un coefficiente di restituzione più alto rispetto alle collisioni tra oggetti di plastilina. Questa evidenza supporta l'ipotesi che le persone intuiscono che il valore del coefficiente di restituzione varia al variare del materiale dell'oggetto, e che il pattern delle collisioni è influenzato dall'elasticità degli oggetti che si scontrano. Inoltre, la somiglianza dei valori

degli *NC* degli oggetti di legno e polistirolo rispetto agli *NC* degli oggetti di plastilina è coerente con l'idea che i soggetti basino i loro giudizi di naturalezza sulle proprietà degli oggetti presentati nelle collisioni, piuttosto che sulla loro massa.

## **2.2 Tre modelli di riferimento: *the Newtonian observer, the Heuristic observer, the Michottean observer***

I modelli presentati in seguito formulano delle previsioni sui giudizi espliciti di naturalezza o causalità, a seconda dell'esperimento e dei soggetti. Tali modelli rappresentano le tre diverse concezioni riguardo alla percezione degli eventi dinamici e delle collisioni.

Ciascun modello si basa sull'assunto che, per ciascuna collisione-stimolo, i soggetti formulino un giudizio implicito di naturalezza o di causalità. Il giudizio implicito può essere rappresentato su una scala continua da 0 a 1, in cui 0 è *del tutto innaturale o non causato* mentre 1 è *del tutto naturale o causato*. Per passare dal giudizio implicito al giudizio esplicito i soggetti devono utilizzare una semplice regola di risposta dicotomica, in cui si può rispondere *naturale o causato* quando il giudizio implicito supera una certa soglia critica, al contrario la risposta sarà *innaturale o non causato* quando il giudizio implicito non supera la soglia critica.

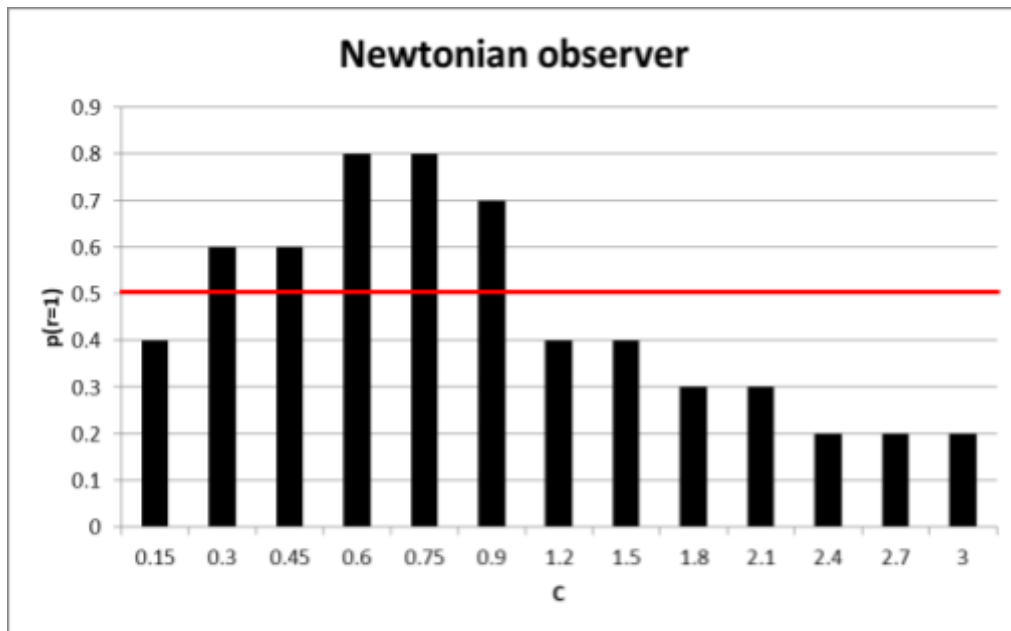
Per formulare le previsioni derivate dai diversi modelli, ci basiamo sull'assunto che la soglia critica dell'osservatore ideale corrisponda a 0.5, quindi l'osservatore ideale risponde *naturale* o *causato* ogniqualvolta il giudizio implicito di naturalezza o causalità è maggiore di 0.5, mentre risponde *innaturale* o *non causato* se il giudizio è compreso tra 0 e 0.5.

### **2.2.1 The Newtonian observer**

L'idea alla base di questo modello è che l'osservatore risponda in modo coerente con la fisica, assumendo che i corpi possiedano un elevato livello di elasticità (assunto ragionevole per corpi apparentemente rigidi come i due quadrati *A* e *B*). Questo modello si basa sulla prospettiva Bayesiana e sull'assunto che le leggi fisiche siano interiorizzate

Secondo questo modello, la massima impressione di naturalezza o di causalità si ha per valori di  $C = 0.6$  e  $C = 0.75$ . L'impressione di naturalezza o causalità diminuisce mano a mano che ci si allontana da questi valori. È importante notare che in questo modello i giudizi di naturalezza o causalità che superano la soglia critica che porta a rispondere *naturale* o *causato* sono tutti quelli fisicamente plausibili, con  $C$  compreso tra 0.3 e 0.9. Il valore  $C = 0.15$  è fisicamente plausibile, ma si assume che tale valore sia troppo basso per apparire percettivamente plausibile nel caso di collisioni tra corpi rigidi, che come detto sono tipicamente associate a valori di  $C$  piuttosto elevati.

Per tutti i valori di  $C > 1$  la soglia critica non viene mai superata, in quanto tutti fisicamente impossibili. Le previsioni sui giudizi di naturalezza o causalità sono mostrate nel grafico ( vedi Figura 2).



**Figura 2.** Il grafico mostra le previsioni del modello Newtonian observer sui giudizi di naturalezza o causalità in funzione del parametro  $C$ . La linea rossa corrisponde alla soglia critica (0.5), oltre la quale il modello prevede una risposta *naturale* o *causato*.



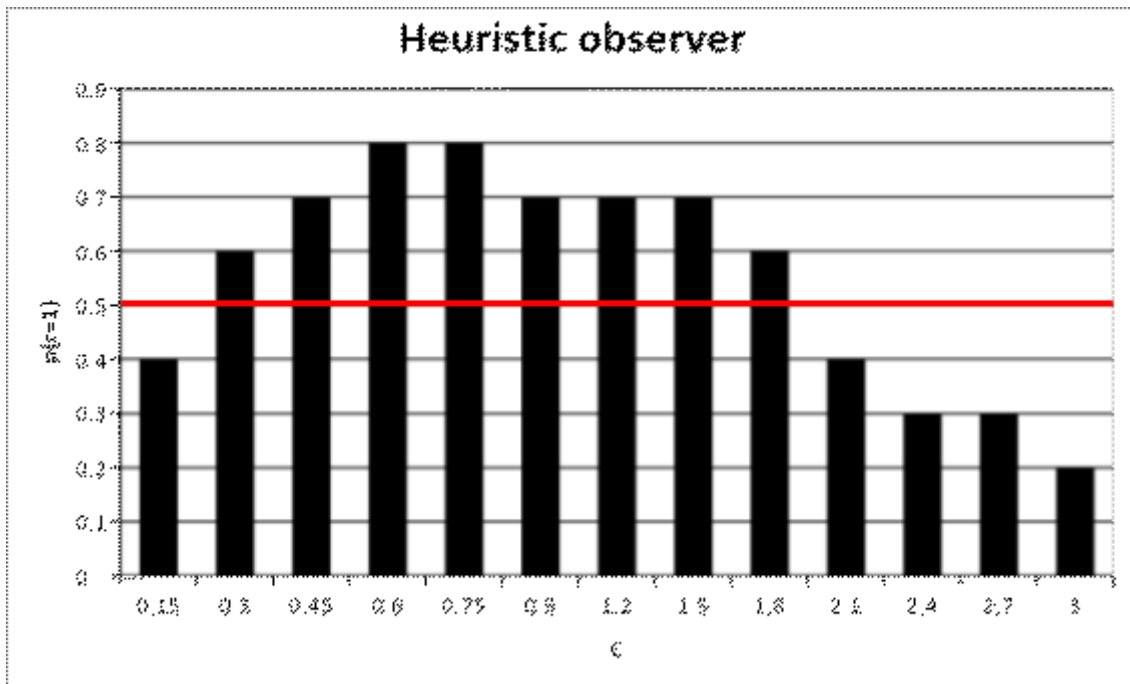
### 2.2.2 *The Heuristic observer*

Secondo questo modello, l'osservatore risponde secondo un'euristica approssimativa, che è solo parzialmente coerente con le leggi fisiche Newtoniane.

Per questo modello, prendiamo come riferimento i risultati ottenuti da Vicovaro e Burigana (2016) per oggetti di legno. In tale studio sono stati stimati l'*upper naturalness bound* e il *lower naturalness bound*. L'*upper naturalness bound* è il valore di  $C$  al di sopra del quale una collisione viene giudicata innaturale più del 50% delle volte; il *lower naturalness bound* è il valore di  $C$  al di sotto del quale una collisione viene giudicata innaturale più del 50% delle volte. Compreso tra queste due soglie si trova il *naturalness interval*, che è l'intervallo di valori di  $C$  in cui una collisione viene giudicata naturale più del 50% delle volte. Assumiamo dunque che l'osservatore risponda *naturale* o *causato* per valori di  $C$  compresi tra 0.3 e 1.8, cioè il *naturalness interval* dello studio di Vicovaro e Burigana (2016) per collisioni tra corpi rigidi come sfere di legno o polistirolo.

Rispetto al modello Newtoniano, si assume una distribuzione della probabilità di risposta leggermente più ampia, che decresce in modo più graduale all'aumentare del valore di  $C$ . In altre parole, assumiamo che questo osservatore tenda a rispondere *innaturale* o *non causato* esclusivamente per valori abbastanza estremi di  $C$ .

Le previsioni sui giudizi di naturalezza o causalità sono mostrate nel grafico ( vedi Figura 3).



**Figura 3.** Il grafico mostra le previsioni del modello Heuristic observer sui giudizi di naturalezza o causalità in funzione del parametro  $C$ . La linea rossa corrisponde alla soglia critica (0.5), oltre la quale il modello prevede una risposta *naturale* o *causato*.

### 2.2.3 The Michottean observer

Questo modello è basato sulla prospettiva michottiana che vede la causalità nelle collisioni orizzontali come un fenomeno esclusivamente percettivo, l'impressione visiva di causalità può essere colta direttamente dalle proprietà cinetiche secondo le modalità descritte dall' *ampliation of movement*.

Secondo questo modello, l'osservatore risponde *naturale* o *causato* quando lo stimolo dà origine all'effetto lancio (Michotte, 1963), ovvero quando  $v_B \leq 2u_A$ . Mentre i modelli precedenti si basano sull'idea che la variabile rilevante per la risposta sia  $C$ , questo modello si basa sull'idea che la variabile rilevante sia il rapporto tra velocità pre-collisione di  $A$  e velocità post-collisione di  $B$ . Questo significa che questo modello fa previsioni diverse a seconda del valore di  $m_R$  (mentre le previsioni sono identiche per i due livelli di  $u_A$ ). L'idea è che l'impressione ottimale di naturalezza o causalità si ottenga quando la velocità post-collisione di  $B$  è simile ma leggermente più bassa rispetto alla velocità pre-collisione di  $A$ . L'impressione diminuisce man mano che il rapporto tra  $v_B$  e  $u_A$  si discosta da 1, soprattutto in senso positivo (cioè  $v_B > u_A$ ). Si assume che la probabilità di risposta 1 (cioè "*naturale*" o "*causato*") sia data dal seguente schema:

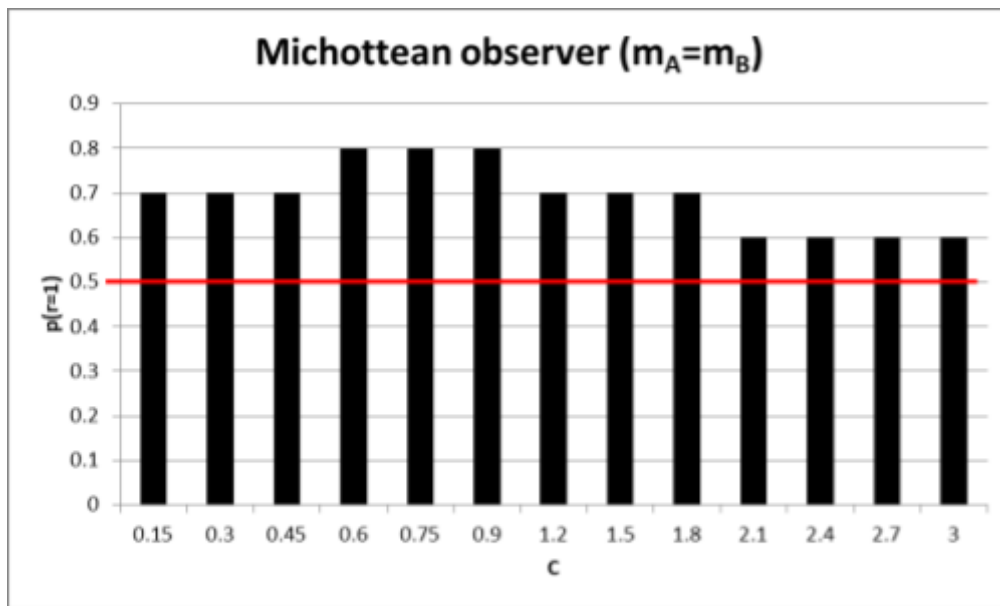
- 0.8 quando  $0.8u_A \leq v_B \leq u_A$ ,
- 0.7 quando  $0.5u_A < v_B < 0.8u_A$  oppure  $u_A < v_B < 1.5u_A$
- 0.6 quando  $0 < v_B \leq 0.5u_A$  oppure  $1.5u_A \leq v_B \leq 2u_A$

- 0.4 quando  $2u_A < v_B < 2.5u_A$

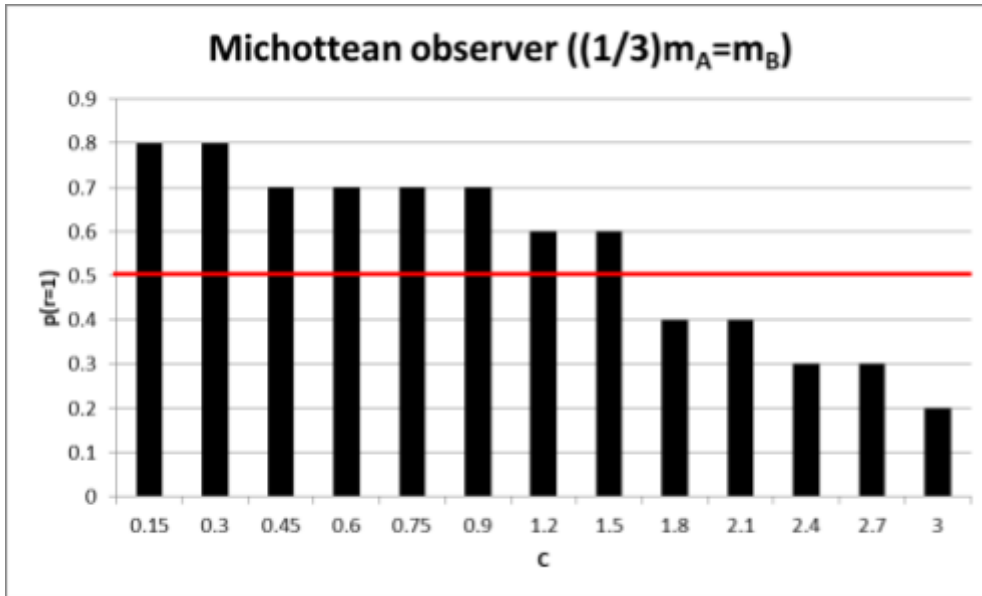
- 0.3 quando  $2.5u_A \leq v_B < 3u_A$

- 0.2 quando  $3u_A \leq v_B$

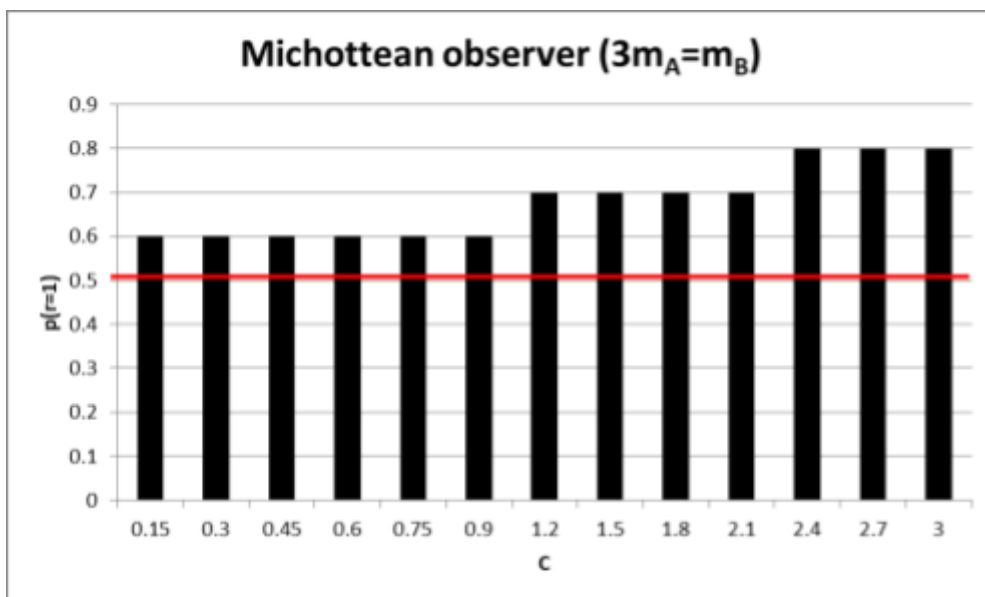
Come accennato sopra, questo modello non si basa sull'idea che il parametro rilevante per la risposta dell'osservatore sia  $C$ , ma si basa sull'idea che il parametro rilevante sia la relazione tra  $u_A$  e  $v_B$ . Quindi, prevede che l'effetto di  $C$  sul giudizio di collisione sia modulato da  $m_R$ , nel modo mostrato dai seguenti grafici (vedi Figura 4 ; Figura 5 ; Figura 6)



**Figura 4.** Il grafico mostra le previsioni del modello Michottean observer sui giudizi di naturalezza o causalità in funzione del parametro  $C$ , per il rapporto di massa  $m_A=m_B$ . La linea rossa corrisponde alla soglia critica (0.5), oltre la quale il modello prevede una risposta *naturale* o *causato*.



**Figura 5.** Il grafico mostra le previsioni del modello Michottean observer sui giudizi di naturalezza o causalità in funzione del parametro  $C$ , per il rapporto di massa  $1/3m_A=m_B$ . La linea rossa corrisponde alla soglia critica (0.5), oltre la quale il modello prevede una risposta *naturale* o *causato*.



**Figura 6.** Il grafico mostra le previsioni del modello Michottean observer sui giudizi di naturalezza o causalità in funzione del parametro  $C$ , per il rapporto di massa  $3m_A=m_B$ . La linea rossa corrisponde alla soglia critica (0.5), oltre la quale il modello prevede una risposta *naturale* o *causato*.

### 2.3 Modello di stima della manica

Le risposte dei soggetti non dipendono unicamente da quanto una collisione venga percepita come naturale o causata, dipendono anche dalla tendenza spontanea di ogni soggetto a dare più risposte di tipo *naturale* o *causato* oppure più risposte di tipo *innaturale* o *non causato*.

Il modello di stima della manica serve ad individuare qual è questa tendenza individuale nel dare una tipologia di risposta piuttosto che un'altra. Le risposte dei soggetti vengono quindi corrette tenendo conto di tale tendenza individuale alla risposta per ricostruire dei giudizi genuini senza l'influenza del parametro decisionale utilizzato dai singoli soggetti. È doveroso premettere che una trattazione approfondita del modello di stima della manica va al di là degli scopi di questo elaborato. In questa sede verrà fornita soltanto una trattazione generale dei principi fondamentali del modello. Una trattazione tecnica si può trovare nel recente lavoro di Nucci et al. (2021), mentre un'applicazione del modello al contesto dell'arbitraggio sportivo viene discussa da Spoto et al. (2021). Secondo questo modello, a ciascuna collisione viene attribuito un valore implicito di naturalezza o causalità in un range di valori che va da 0 a 1, in cui lo 0 è totalmente innaturale o non causata e l'1 è totalmente naturale o causata, la soglia critica è posta a 0.5. Ogni partecipante ha la propria soglia di risposta, ad esempio un soggetto risponde naturale o causato ogni qualvolta venga superata la soglia 0.3, mentre un altro soggetto risponde naturale o causato quando viene superata la soglia 0.7. Per effetto della differenza delle soglie di

risposta individuali dei partecipanti, potremmo avere risposte diverse da partecipanti che implicitamente valutano la collisione allo stesso modo: una collisione valutata implicitamente da due soggetti come 0.4 viene giudicata naturale o causata da un soggetto con soglia 0.3, viene invece giudicata innaturale o non causata da un soggetto con soglia 0.7.

Il modello della stima della manica fornisce come output il valore delle soglie individuali dei partecipanti e corregge le risposte assumendo che la soglia sia 0.5 per tutti i soggetti, facendo sì che si possa ricostruire il reale accordo tra gli osservatori e il modello di riferimento.





## CAPITOLO 3

### **Tre esperimenti sulle collisioni: naturalezza, causalità di *A* su *B* e causalità di *B* su *A***

#### **3.1 Esperimenti sul giudizio di naturalezza e causalità: gli obiettivi**

Ai partecipanti viene mostrata una situazione stimolo in cui viene visualizzato un evento di collisione orizzontale simile all'effetto lancio di Michotte (vedi Figura 1). Il compito dei partecipanti all'esperimento sul giudizio di naturalezza è quello di giudicare la naturalezza della collisione mostrata attraverso una regola di risposta "*naturale/innaturale*", selezionabile mediante la pressione di due tasti sulla tastiera.

Il compito dei partecipanti all'esperimento sul giudizio di causalità di *A* su *B* è quello di giudicare se il movimento di *B* è causato dalla collisione con *A*, attraverso una regola di risposta "*causato/non causato*", selezionabile mediante la pressione di due tasti sulla tastiera.

Il compito dei partecipanti all'esperimento sul giudizio di causalità di *B* su *A* è quello di giudicare se il movimento di *A* è causato dalla collisione con *B*,

attraverso una regola di risposta “*causato/non causato*”, selezionabile mediante la pressione di due tasti sulla tastiera.

L’obiettivo è quello di testare l’accordo tra le previsioni dei tre modelli e le risposte dei soggetti. In altre parole, quale modello rappresenti al meglio le risposte dei soggetti in ciascuno dei tre esperimenti. Un altro obiettivo è quello di analizzare gli effetti delle variabili *C*, la velocità pre-collisione di *A* e le massa di *A* e di *B*.

### **3.1.1 Partecipanti esperimento sul giudizio di naturalezza**

34 partecipanti hanno preso parte all’esperimento su base volontaria. La loro età era compresa tra i 19 anni e i 76 anni ( $M=41.4$ ,  $SD=21.5$ ). Il campione era composto da 10 maschi e 24 femmine. I partecipanti avevano studiato fisica in media per 2.41 anni ( $SD=2.4$ ).

In questo e nei successivi esperimenti, i partecipanti non erano a conoscenza degli obiettivi dell’esperimento, e veniva sottoposto loro un consenso informato approvato dal comitato etico (Dipartimento di Psicologia Generale, Università degli Studi di Padova)

### **3.1.2 Partecipanti esperimento sul giudizio di causalità di *A* su *B***

30 partecipanti hanno preso parte all’esperimento su base volontaria. La loro età era compresa tra i 21 anni e i 59 anni ( $M=27.4$ ,  $SD=8.1$ ). Il campione

era composto da 17 maschi e 13 femmine. I partecipanti hanno studiato fisica in media per 3.17 anni (SD=1.9).

### **3.1.3 Partecipanti esperimento sul giudizio di causalità di *B* su *A***

30 soggetti hanno partecipato all'esperimento su base volontaria. La loro età era compresa tra i 20 anni e i 66 anni (M=25.93, SD=11.1), Il campione era suddiviso in 22 maschi e 8 femmine. I partecipanti avevano studiato fisica in media per 4.3 anni (SD=1.7).

## **3.2 Design degli stimoli**

Gli stimoli venivano presentati sullo schermo di un computer. All'inizio di ciascuna animazione, comparivano sullo sfondo bianco due piccoli quadrati neri di lato 1 cm, allineati sull'asse orizzontale dello schermo. Il quadrato *B* era posizionato al centro dello schermo, mentre il centro del quadrato *A* era spostato 10 cm a sinistra rispetto al centro dello schermo. Dopo 500 ms, *A* iniziava a muoversi verso *B*. Dopo il contatto tra *A* e *B*, quest'ultimo iniziava a muoversi da sinistra a destra, mentre *B* poteva rimbalzare all'indietro oppure continuare a muoversi da sinistra a destra (vedi equazioni presentate in seguito). La fase post-collisione aveva una durata fissa di 1.5 secondi, il che significa che, in alcune circostanze, *B* poteva scomparire oltre il margine destro dello schermo prima della fine dell'animazione.

I rapporti di massa simulati dei due quadrati potevano assumere tre diversi livelli:  $m_A=m_B$ ,  $(1/3)m_A=m_B$ ,  $3m_A=m_B$ . È doveroso precisare che il quadrato  $A$  e il quadrato  $B$  sono due stimoli generati al computer, di conseguenza non possiedono una vera massa ed in questo caso nemmeno indizi percettivi che possano guidare il soggetto nell'inferenza del loro peso.  $A$  e  $B$  non vengono in alcun modo modificati nella grandezza, forma e colore per suggerire una massa diversa, infatti in tutti i trial appaiono come due quadrati neri identici di lato 1 cm. Secondo quanto postulato nel *KSD* da Runeson e Frykholm (vedi paragrafo 1.1.3) il sistema visivo è in grado di percepire la massa relativa degli oggetti coinvolti in eventi dinamici basandosi sulla relazione tra le velocità pre- e post-collisione. Nel caso dei nostri quadrati il rapporto di massa simulato può essere colto solamente dall'influenza che ha sulle velocità post-collisione. Infatti se la massa del quadrato  $A$  tende ad essere infinitamente più grande della massa del quadrato  $B$  avremo che  $v_A \rightarrow u_A$  e  $v_B \rightarrow u_A(1 + C)$ ; se la massa del quadrato  $B$  tende ad essere infinitamente più grande della massa del quadrato  $A$  avremo che  $v_A \rightarrow -Cu_A$  e  $v_B \rightarrow 0$ .

Il coefficiente di restituzione ( $C$ ) poteva assumere i seguenti valori: 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7, 3.

Nella fase pre-collisione, il quadrato  $A$  si muoveva verso il quadrato  $B$  con una velocità pre-collisione ( $u_A$ ) che poteva assumere i valori di 7.5 cm/s o 15 cm/s; il quadrato  $B$  rimane fermo.

Nella fase post-collisione le velocità di  $A$  e  $B$  (rispettivamente  $v_A$  e  $v_B$ ) sono determinate dalle formule:

$$v_A = \frac{m_A u_A + m_B u_B + m_B C(u_B - u_A)}{m_A + m_B}$$

$$v_B = \frac{m_A u_A + m_B u_B + m_A C(u_A - u_B)}{m_A + m_B}$$

Se poniamo il rapporto di massa  $m_A = m_B$ , avremo che:

$$v_A = 0.5u_A(1 - C)$$

$$v_B = 0.5u_A(1 + C)$$

Se poniamo il rapporto di massa  $(1/3)m_A = m_B$ , avremo che:

$$v_A = \frac{3}{4}u_A(1 - \frac{1}{3}C)$$

$$v_B = \frac{3}{4}u_A(1 + C)$$

Se poniamo il rapporto di massa  $3m_A = m_B$ , avremo che:

$$v_A = \frac{1}{4}u_A(1 - 3C)$$

$$v_B = \frac{1}{4}u_A(1 + C)$$

gli stimoli mostrati sono 156 per partecipante, questo numero di stimoli viene prodotto da un disegno fattoriale 3 (rapporti di massa) x 2 ( $u_A$ ) x 13 (C) x 2 (ripetizioni).

### 3.3 Procedura sperimentale

Ai partecipanti dei tre diversi esperimenti venivano presentati gli stessi 156 stimoli. In tutti gli esperimenti, i soggetti vengono informati, attraverso delle istruzioni scritte, che sarebbero state loro presentate delle simulazioni di collisioni tra due quadratini neri.

Le istruzioni scritte date ai soggetti per l'esperimento sul giudizio di naturalezza erano: *“ Di seguito, ti verranno presentate delle collisioni tra due oggetti.*

*In alcuni casi, queste collisioni potranno apparire NATURALI, in altri casi potranno apparire INNATURALI. Per collisioni NATURALI si intendono quelle collisioni che sembrano coerenti con le leggi della fisica. In questo caso, a seguito della collisione, i due oggetti sembrano muoversi come farebbero degli oggetti reali che entrano in collisione tra loro.*

*Invece, per collisioni INNATURALI si intendono quelle collisioni che sembrano incoerenti con le leggi della fisica. In questo caso, dopo la collisione, i due oggetti sembrano muoversi in modo "strano", come se il loro movimento non dipendesse dalla collisione ma da qualche altra forza esterna.*

*Dopo la presentazione di ciascuna collisione, vedrai comparire una schermata che ti chiede di indicare se la collisione appena vista era NATURALE oppure INNATURALE.*

*Se la collisione ti appare NATURALE dovrai premere il tasto "S", se la collisione ti appare INNATURALE dovrai premere il tasto "K".*

Le istruzioni scritte date ai soggetti per l'esperimento sul giudizio di causalità di A su B erano: *“ Di seguito, ti verranno presentate delle scene che coinvolgono due quadratini, uno centrale che rimane inizialmente fermo, e uno a sinistra che inizia subito a muoversi verso quello centrale. Dopo il contatto tra i due quadratini, in alcuni casi sembrerà che il movimento del quadratino centrale sia CAUSATO dalla collisione con il quadratino di sinistra . In altri casi, sembrerà che il movimento del quadratino centrale NON SIA CAUSATO dalla collisione con il quadratino di sinistra. Per CAUSATO si intende che, dopo il contatto con il quadratino di sinistra, il quadratino centrale sembra muoversi per effetto della collisione. Per NON CAUSATO, si intende che, dopo il contatto con il quadratino di sinistra, il movimento del quadratino centrale sembra dovuto a qualche forza esterna che lo spinge o lo rallenta. Dopo la presentazione di ciascuna scena, vedrai comparire una schermata che ti chiede di indicare se il movimento del quadratino centrale appariva CAUSATO oppure NON CAUSATO dalla collisione con il quadratino di sinistra.*

*Se ritieni che il movimento sia CAUSATO dovrai premere il tasto "S", se ritieni che il movimento NON SIA CAUSATO dovrai premere il tasto "K".*

Infine, le istruzioni scritte date ai soggetti per l'esperimento sul giudizio di causalità di B su A erano: *“ Di seguito, ti verranno presentate delle scene che coinvolgono due quadratini, uno centrale che rimane inizialmente fermo, e uno*

*a sinistra che inizia subito a muoversi verso quello centrale. Dopo il contatto tra i due quadratini, in alcuni casi sembrerà che il movimento del quadratino A SINISTRA sia CAUSATO dalla collisione con il quadratino centrale . In altri casi, sembrerà che il movimento del quadratino a sinistra NON SIA CAUSATO dalla collisione con il quadratino centrale. Per CAUSATO si intende che, dopo il contatto con il quadratino centrale, il quadratino A SINISTRA sembra muoversi per effetto della collisione. Per NON CAUSATO, si intende che, dopo il contatto con il quadratino di centrale, il movimento del quadratino A SINISTRA sembra dovuto a qualche forza esterna che lo spinge o lo rallenta. Dopo la presentazione di ciascuna scena, vedrai comparire una schermata che ti chiede di indicare se il movimento del quadratino A SINISTRA appariva CAUSATO oppure NON CAUSATO dalla collisione con il quadratino centrale. Se ritieni che il movimento sia CAUSATO dovrai premere il tasto "S", se ritieni che il movimento NON SIA CAUSATO dovrai premere il tasto "K".*

Dopo le istruzioni, ai partecipanti venivano mostrati 12 stimoli di prova selezionati in maniera casuale dai 156 disponibili, per consentire loro di familiarizzare con il compito.

Dopo ciascuna animazione, compariva una schermata bianca durante la quale i partecipanti dovevano premere il tasto S o il tasto K sulla tastiera per rispondere (non vi erano limiti temporali per la risposta, e i tempi di risposta non venivano registrati). Immediatamente dopo la risposta da parte del partecipante, veniva presentata una nuova animazione.



### 3.4 Risultati

Le analisi sono state eseguite sulle risposte date dai partecipanti dopo essere state corrette utilizzando il modello di stima della manica (vedi paragrafo 2.3), il quale stima la soglia decisionale individuale oltre la quale ognuno dei soggetti tende a dare *naturale* o *causato* come risposta, e la corregge a 0.5 per tutti i partecipanti. Eliminando il rumore dovuto alle diverse soglie individuali, abbiamo ottenuto dei giudizi più omogenei. In altre parole, il modello corregge le risposte di ciascun partecipante, uniformandole a quelle che sarebbero state le risposte se il partecipante avesse avuto una soglia pari a 0.5.

#### 3.4.1 Livello di accordo tra i soggetti e i tre modelli di riferimento

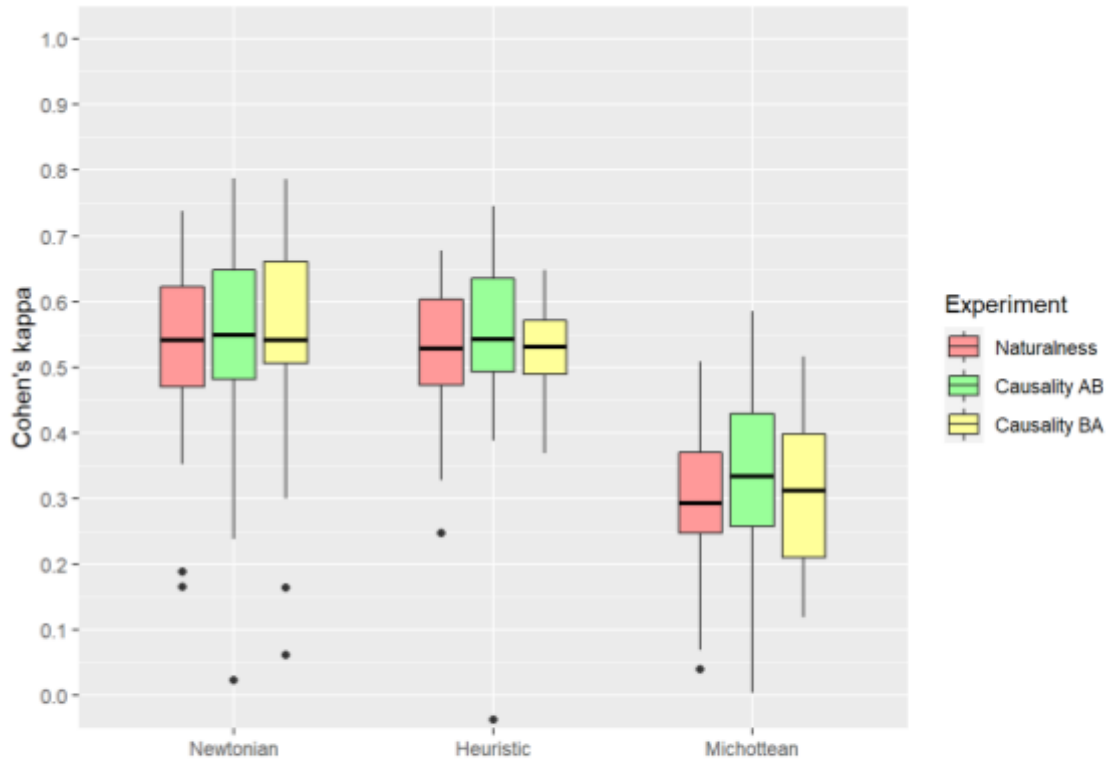
Abbiamo testato il livello di accordo tra gli osservatori e le previsioni di ognuno dei 3 modelli di riferimento dopo l'aggiustamento fatto grazie al modello di stima della manica, per ognuno dei tre esperimenti. L'accordo è stato calcolato utilizzando la statistica  $\kappa$  di Cohen.

L'indice  $\kappa$  di Cohen è stato calcolato per ciascun partecipante, relativamente a ciascuno dei tre modelli di riferimento. L'indice può assumere qualsiasi valore da -1 a 1: se  $\kappa = -1$  significa che abbiamo un disaccordo completo tra i giudizi del partecipante sulle 156 situazioni-stimolo e le previsioni del relativo modello. Questo significa che i soggetti danno risposte diverse in ciascuna delle 156 situazioni-stimolo. Se  $\kappa = 1$ , significa che abbiamo un

accordo completo tra i giudizi del partecipante sulle 156 situazioni-stimolo, e le previsioni del relativo modello; se  $\kappa = 0$  significa che il livello di accordo tra i giudizi del partecipante e le previsioni del modello sulle 156 situazioni-stimolo è dovuto al caso. Semplificando un po', è il livello di accordo che si otterrebbe qualora il soggetto rispondesse a caso. Ricordiamo brevemente quali sono i dati sui quali viene calcolato l'accordo osservatore-modello. Da un lato, le risposte soggettive aggiustate dopo l'applicazione del modello della manica. Dall'altro, le previsioni di ciascun modello sulla probabilità che una certa situazione-stimolo venga percepita come "naturale" o "causata", rappresentate nelle Figure 2-6, e dicotomizzate con soglia 0.5 (i.e., se il valore di probabilità previsto è uguale o inferiore a 0.5, allora la risposta prevista è "innaturale/non causata", viceversa la risposta prevista è "naturale/causata").

Valutiamo quindi l'accordo tra il singolo soggetto e le previsioni di ognuno dei tre modelli di riferimento sulle 156 situazioni-stimolo. Prima di procedere con l'analisi sono stati eliminati gli outliers (vedi Figura 7), eliminando quindi tutti i dati dei partecipanti che risultano essere outliers per almeno uno dei modelli. Come si può vedere in Figura 7, in alcuni casi si registra un livello estremamente basso di accordo per almeno uno dei tre modelli, il che porta ad escludere i dati del relativo outlier. Questo porta all'esclusione dei dati di 7 soggetti in totale: 4 per l' esperimento di naturalezza, 1 per l' esperimento di causalità di *A* su *B* e 2 per l' esperimento di causalità di *B* su *A*.

Le stime del livello di accordo tra i partecipanti e i tre modelli di riferimento, espresso in termini di  $\kappa$  di Cohen, è mostrato nel grafico seguente (vedi Figura 7).



**Figura 7.** Il grafico mostra l'accordo medio (espresso in  $K$  di Cohen) tra le risposte degli osservatori e le previsioni dei tre modelli di riferimento (in ascissa), per ognuno dei tre esperimenti. I punti neri rappresentano gli outliers.

Come si può vedere osservando il grafico in figura 7 il livello medio di accordo sia per il modello Newtoniano che per il modello euristico tende ad assumere un valore poco superiore a 0.5 in tutti e tre gli esperimenti, che corrispondono ad un accordo sul 79% delle situazioni-stimolo per il modello newtoniano ed un accordo del 78% delle situazioni-stimolo per il modello euristico; possiamo quindi concludere che il modello Newtoniano ed il modello

euristico hanno entrambi una buona performance nel prevedere i giudizi dei soggetti in tutti e tre gli esperimenti. Il modello michottiano ha una performance nettamente inferiore rispetto agli altri due modelli.

Un'ANOVA mista su  $\kappa$ , con *Esperimento* come fattore tra i soggetti (3 livelli: Giudizio di naturalezza, Giudizio di causalità di *A* su *B*, Giudizio di causalità di *B* su *A*), e *Modello* come fattore entro i soggetti (3 livelli: Newtonian, Heuristic, Michottean), ha mostrato che il main effect del modello era statisticamente significativo [ $F(2,168) = 225.62, p < .001, \eta_G^2 = .55$ ]. Il main effect del tipo di esperimento [ $F(2,84) = 0.55, p = .57, \eta_G^2 = .007$ ] e l'effetto di l'interazione tra modello ed esperimento [ $F(4,168) = 0.57, p = .69, \eta_G^2 = .006$ ] non erano statisticamente significativi. Ciò significa che il livello di accordo tra i dati empirici e le previsioni dei modelli non variavano con il tipo di esperimento. I confronti post-hoc (metodo di correzione FDR) hanno mostrato che il  $\kappa$  medio per il modello Newtoniano ( $\kappa = .569, SD = .110$ ) non era significativamente diverso dal  $\kappa$  medio per il modello Euristico ( $\kappa = .548, SD = .084; p = .18$ ). Il modello Michottiano ( $\kappa = .319, SD = .115$ ) aveva una performance significativamente peggiore rispetto agli altri due modelli ( $ps < .001$ ).

Le risposte dei soggetti possono quindi essere ben descritte sia dal modello newtoniano che da quello euristico, mettendo in luce che i partecipanti hanno una buona sensibilità alla plausibilità fisica del parametro *C*, che è il parametro sul quale si basano le previsioni del modello newtoniano e di quello euristico. Questi due modelli sembrano tuttavia avere una performance

equivalente, il che significa che la sensibilità a  $C$  non è sufficientemente raffinata da portare i soggetti ad una coerenza perfetta rispetto alle previsioni del modello newtoniano.

Un'altra conclusione che possiamo trarre è che i partecipanti non utilizzano un modello di risposta michottiano per formulare i giudizi riguardo alle collisioni mostrate in questo esperimento, il che avvalorata la tesi che quando ai partecipanti vengono chiesti giudizi espliciti di naturalezza o di causalità non si basano su impressioni genuinamente visive come previsto dalla prospettiva michottiana dell'ampliation of movement ma piuttosto su schemi cognitivi basati sulle esperienze pregresse e alle leggi newtoniane interiorizzate (seppur in modo non perfetto, come dimostrato dall'elevata performance del modello Euristico).

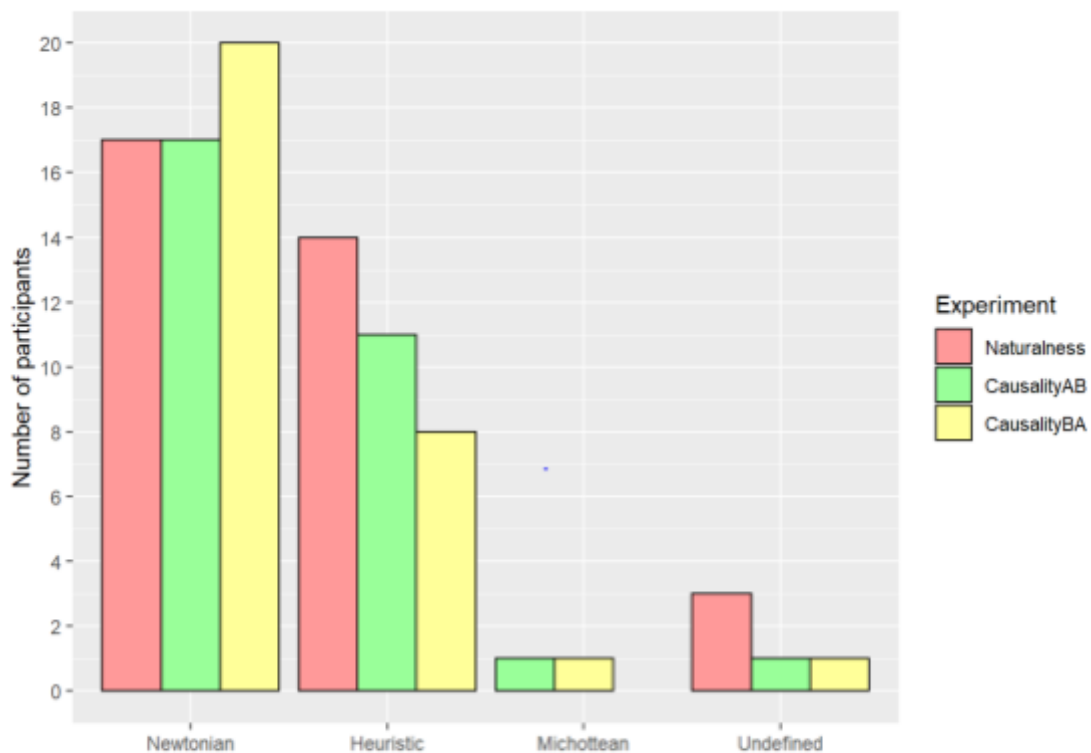
Le performance dei tre modelli sembrano essere identiche per i tre esperimenti, suggerendo che i soggetti utilizzano lo stesso modello di riferimento indipendentemente dal tipo di compito svolto.

Per avere un quadro più chiaro del modello di risposta utilizzato dagli osservatori in ciascun compito, abbiamo cercato di attribuire un modello di risposta preferito a ciascun osservatore. Per ciascun partecipante, il modello di risposta preferito è quello corrispondente al valore più alto di  $\kappa$ . Tuttavia, il fatto che le risposte di un partecipante siano più coerenti con un certo modello rispetto ad altri modelli non è sufficiente per concludere che quel partecipante utilizzi un dato modello di risposta piuttosto che un altro. Infatti, potrebbe essere

che il livello più alto di  $\kappa$  per un soggetto sia comunque molto basso. Questo indicherebbe una carenza di consistenza tra il modello selezionato e le risposte del soggetto.

Abbiamo quindi stabilito di attribuire un certo modello di risposta ad un soggetto solo quando il valore più alto di  $\kappa$  supera il valore 0.4, che è un valore scelto arbitrariamente, e che corrisponde a circa il 70% di accordo tra le risposte del partecipante e le previsioni del modello. Se il valore più grande di  $\kappa$  per un partecipante non supera il valore di 0.4, allora quel soggetto verrà classificato come “*undefined*”. In questa analisi sono compresi gli outliers esclusi in precedenza.

I risultati sono mostrati nel seguente grafico (vedi figura 8).



**Figura 8.** Il grafico mostra il numero di partecipanti (in ordinata) che tendono ad usare un dato modello di risposta (in ascissa), divisi per i tre esperimenti.

Secondo quanto mostrato dal grafico in figura 8, per l'esperimento di naturalezza abbiamo 17 soggetti che preferiscono il modello newtoniano, 14 soggetti che preferiscono il modello euristico, nessun soggetto per il modello michottiano e 3 soggetti indefiniti.

Per l'esperimento di causalità di  $A$  su  $B$  abbiamo 17 soggetti che preferiscono il modello newtoniano, 11 soggetti che preferiscono il modello euristico, 1 soggetto che preferisce il modello michottiano e 1 soggetto indefinito.

Per l'esperimento di causalità di  $B$  su  $A$  abbiamo 20 soggetti che preferiscono il modello newtoniano, 8 soggetti che preferiscono il modello euristico, 1 soggetto che preferisce il modello michottiano e 1 soggetto indefinito.

Questi risultati sembrano suggerire una leggera preferenza per il modello Newtoniano. In effetti, questi ultimi risultati non danno comunque un supporto univoco in favore del modello newtoniano in quanto nella totalità dei tre esperimenti troviamo comunque 33 soggetti che preferiscono il modello euristico.

### **3.4.2 Effetti del rapporto di massa, della velocità pre-collisione di $A$ , e del coefficiente di restituzione $C$ sulla performance del modello Newtoniano**

I risultati visti finora hanno mostrato un buon livello di coerenza tra i giudizi dei partecipanti e le previsioni del modello newtoniano, che riesce a formulare delle previsioni corrette, in media, per il 79% delle situazioni stimolo presentate. Le analisi che verranno presentate di seguito sono concentrate solamente sul modello newtoniano in quanto è risultato essere il modello con la performance migliore. Il modello Newtoniano pur mostrando un buon livello d'accordo non è tuttavia perfetto nel formulare previsioni. Il nostro obiettivo è quello di capire il perchè della discrepanza tra le previsioni del modello newtoniano e le risposte dei soggetti.



Abbiamo quindi analizzato l'influenza di  $u_A$ ,  $C$  e il rapporto di massa sulle risposte dei soggetti aggiustate secondo il modello di stima della manica con priors basate sul modello newtoniano, per ognuno dei tre esperimenti. Se i soggetti rispondessero in modo perfettamente coerente con il modello newtoniano, il solo fattore sperimentale ad influenzare i giudizi dei soggetti dovrebbe essere  $C$ , infatti secondo il modello newtoniano le persone formulano i giudizi unicamente sulla base del coefficiente di restituzione (coerentemente con le leggi fisiche), percependo la collisione come naturale o causale quando  $C$  è compreso tra 0.3 e 0.9. Le altre variabili sperimentali ( $u_A$  e il rapporto di massa) non dovrebbero influire sui giudizi dei soggetti.

L'ipotesi è che la discrepanza tra le previsioni del modello newtoniano e le risposte dei partecipanti possano essere dovute all'influenza della velocità pre-collisione di  $A$  ed al rapporto di massa. Attraverso un'analisi della regressione logistica, testiamo il possibile effetto dei tre fattori sperimentali sulle risposte dei partecipanti per ciascun compito sperimentale. Testiamo anche l'effetto del fattore "*esperimento*", per verificare se i partecipanti rispondono nel medesimo modo in tutti e tre gli esperimenti, oppure se ci sono delle differenze sistematiche. Di seguito verranno mostrate le analisi e i risultati divisi per i tre esperimenti.

*Esperimento sul giudizio di naturalezza:* in figura 9 sono mostrati i grafici che rappresentano l'influenza dei tre fattori sperimentali sulle risposte dei soggetti.

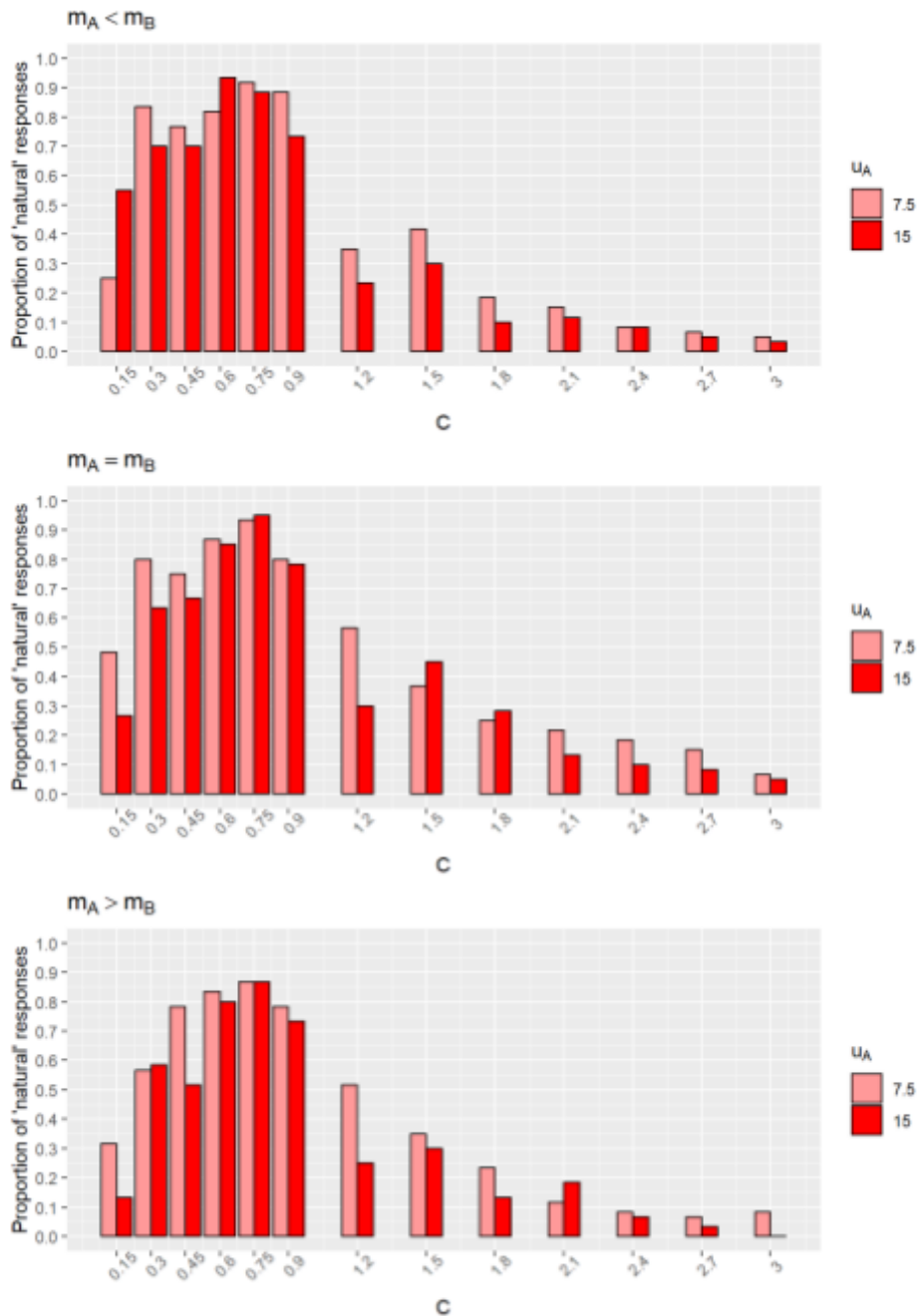


Figura 9. Il grafico mostra l'influenza dei fattori sperimentali sulle risposte dei soggetti nell'esperimento sul giudizio di naturalezza

L'ispezione dei grafici mostra la somiglianza tra i pattern di risposta per i tre diversi rapporti di massa e per i due livelli di velocità. Mostrano anche che le risposte dei soggetti sono tendenzialmente coerenti con le previsioni del modello, cioè la probabilità di rispondere *naturale* supera la probabilità di rispondere *innaturale* quando  $C$  è compreso tra 0.3 e 0.9. Si può notare una netta diminuzione della probabilità di rispondere 'naturale' passando dal valore fisicamente plausibile 0.9 al valore implausibile 1.2.

L'influenza di  $C$  sui giudizi di naturalezza non sembra completamente invariante rispetto al rapporto di massa e a  $u_A$ . Con  $C=0.15$  la proporzione di risposte *naturale* è più alta per  $u_A = 15$  cm/s che per  $u_A = 7.5$  cm/s quando il rapporto di massa è  $m_A < m_B$ , è invece vero il contrario per i rapporti di massa  $m_A = m_B$  e  $m_A > m_B$ . Inoltre, si può notare come i valori fisicamente implausibili  $C=1.2$  e  $C=1.5$  generino una proporzione relativamente alta di risposte *naturale*, soprattutto con  $u_A = 7.5$  cm/s e soprattutto con  $m_A = m_B$ .

Per testare l'invarianza dei giudizi di naturalezza rispetto a  $u_A$ , abbiamo condotto un'analisi di regressione logistica sui giudizi di naturalezza con i predittori  $u_A$ , e  $C$ . L'analisi è stata svolta separatamente per i tre rapporti di massa. Per  $m_A = m_B$  e  $m_A > m_B$  l'effetto di  $u_A$  è statisticamente significativo ( $p = .002$ ;  $p < .001$ ), per  $m_A < m_B$  non lo è ( $p = .197$ ). In tutti e tre i casi, si osserva una tendenza alla diminuzione della probabilità di risposta *naturale* passando dal valore più basso al valore più alto di  $u_A$  (odds ratios 0.853, 0.697, 0.662 per

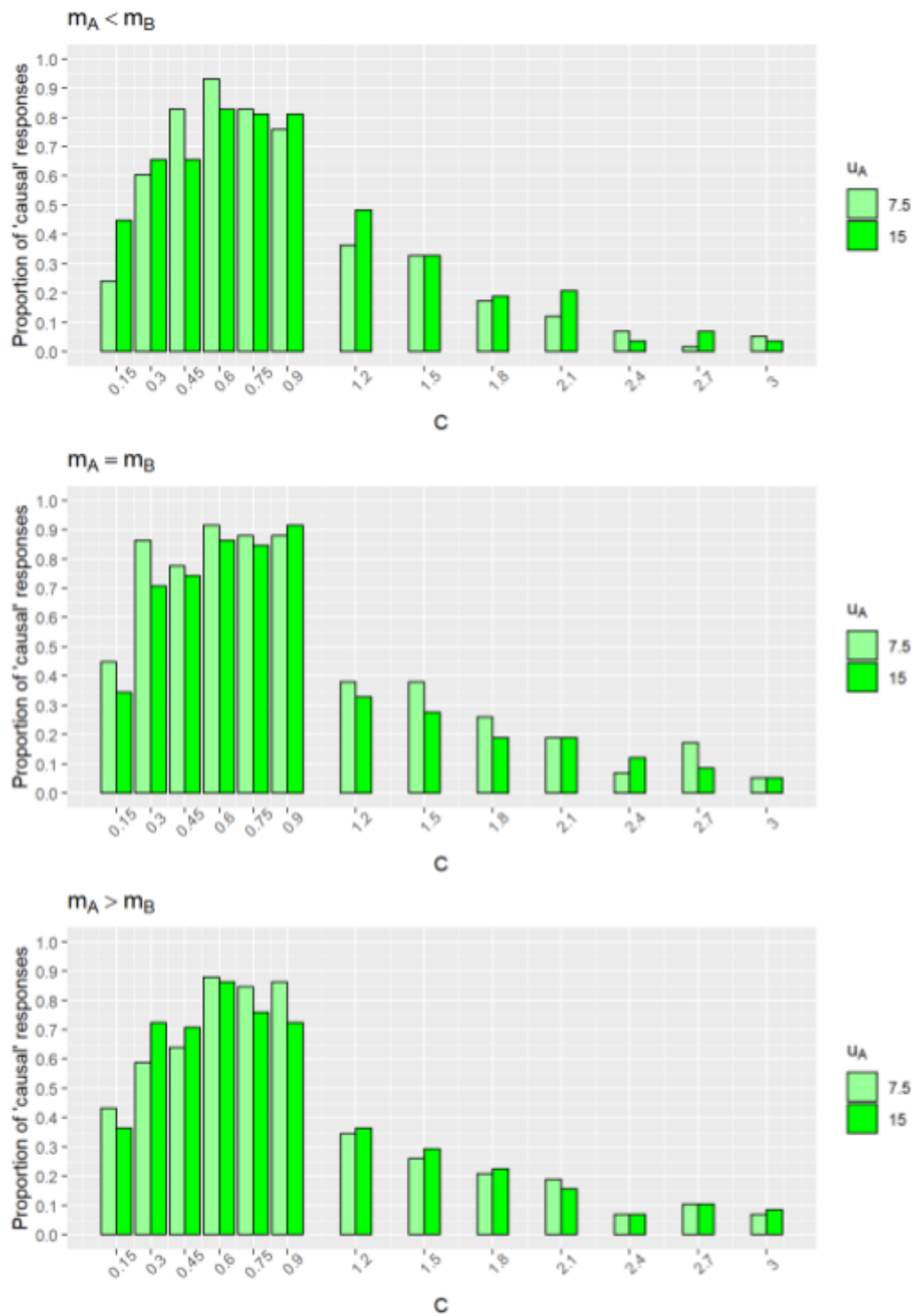
$m_A < m_B$ ,  $m_A = m_B$ , e  $m_A > m_B$  rispettivamente). Questo suggerisce che non c'è un'invarianza completa dei giudizi di naturalezza rispetto ad  $u_A$ . I soggetti mostrano una tendenza a percepire come più naturali le collisioni con una velocità pre-collisione di A relativamente bassa. L'effetto di C è sempre statisticamente significativo ( $p < .001$ ), e di forza confrontabile nelle tre condizioni (odds ratios 0.202, 0.272, 0.281 per  $m_A < m_B$ ,  $m_A = m_B$ , e  $m_A > m_B$  rispettivamente).

Per testare l'invarianza dei giudizi di naturalezza rispetto al rapporto di massa, per ciascuno dei due livelli di  $u_A$  abbiamo condotto un'analisi di regressione logistica sui giudizi di naturalezza con i predittori rapporti di massa e C. L'effetto del rapporto di massa era statisticamente significativo sia per  $u_A = 7.5$  cm/s ( $p = .008$ ), sia per  $u_A = 15$  cm/s ( $p = .001$ ), il che conferma che i giudizi di naturalezza non sono invarianti rispetto al rapporto di massa. Nello specifico, quando  $u_A = 7.5$  cm/s, il valore di odds ratio per il confronto tra  $m_A = m_B$  vs.  $m_A < m_B$  era 1.32, mentre per il confronto tra  $m_A > m_B$  vs  $m_A < m_B$  era 0.93; quando  $u_A = 15$  cm/s, odds ratio (  $m_A = m_B$  vs  $m_A < m_B$  ) = 1.05 e odds ratio (  $m_A > m_B$  vs  $m_A < m_B$  ) = 0.70. L'effetto di C sui giudizi di naturalezza è statisticamente significativo per entrambi i livelli di velocità pre-collisione di A ( $p < .001$ , odds ratios = 0.254 e 0.248 per  $u_A = 7.5$  cm/s e  $u_A = 15$  cm/s rispettivamente).

In sostanza, a parità di altri fattori la probabilità che una collisione venga giudicata naturale è maggiore quando  $m_A = m_B$ , mentre  $m_A > m_B$  sembra sfavorire l'impressione di naturalezza.

Considerando globalmente gli effetti di  $u_A$  e del rapporto di massa sui giudizi di naturalezza, si può concludere che questi sono influenzati dalla velocità post-collisione assoluta di  $B$ . Infatti, la combinazione di valori che sembra maggiormente sfavorire l'impressione di naturalezza è la velocità post-collisione di  $A$  relativamente alta e  $m_A > m_B$ . Entrambe queste condizioni sono associate ad una velocità post-collisione di  $B$  relativamente alta, che sembra sfavorire leggermente la percezione di naturalezza.

*Esperimento sul giudizio di causalità di A su B:* in figura 10 sono mostrati i grafici che rappresentano l'influenza dei tre fattori sperimentali sulle risposte dei soggetti.



**Figura 10.** Il grafici mostrano l'influenza dei fattori sperimentali sulle risposte dei soggetti nell'esperimento sul giudizio di causalità di A su B.

L'ispezione dei grafici mostra un pattern di dati abbastanza simile a quello ottenuto per il giudizio di naturalezza, anche se l'effetto della variabile  $u_A$  nella condizione  $m_A > m_B$  sembra più piccolo rispetto a quello ottenuto per il giudizio di naturalezza.

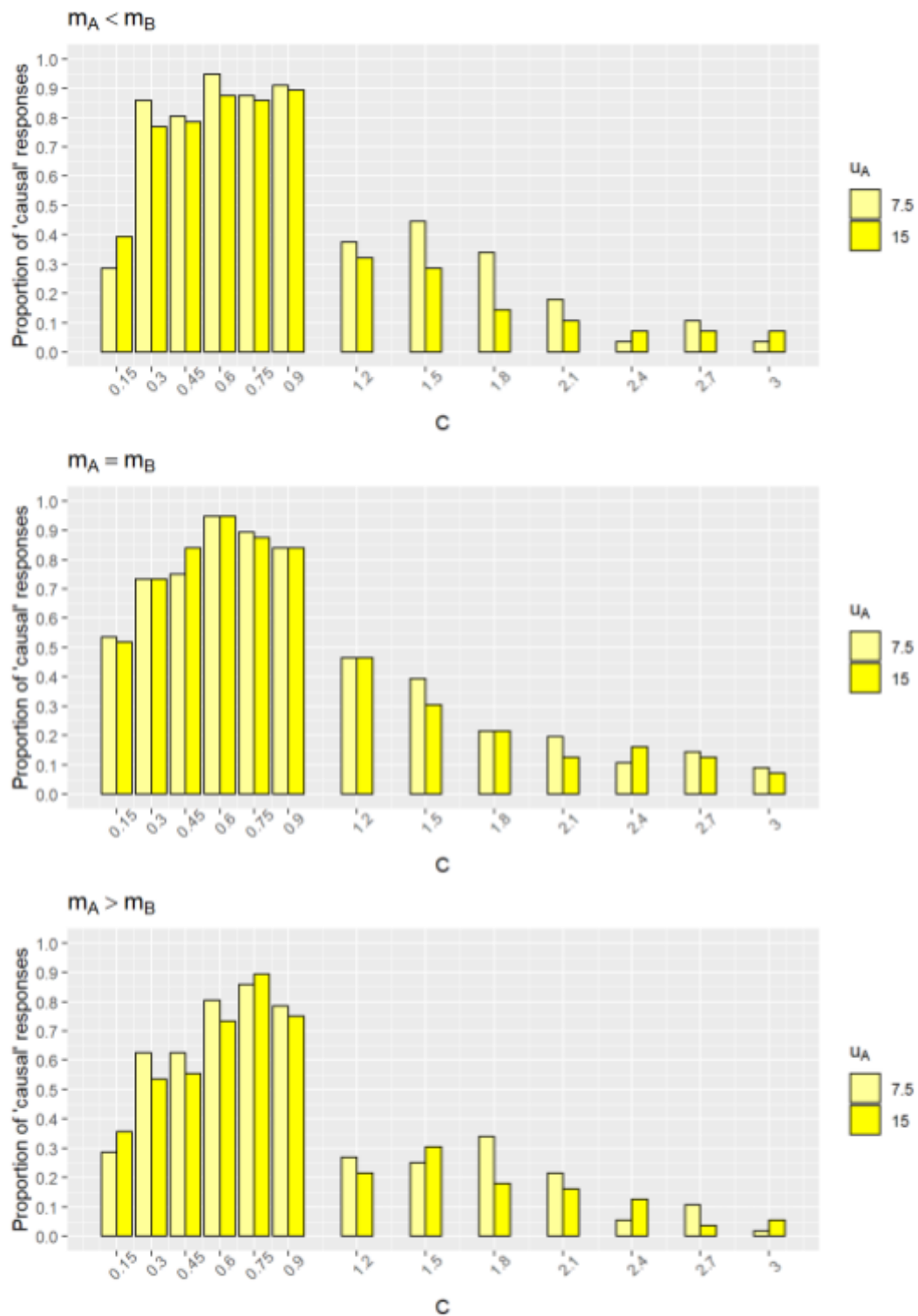
Per testare l'invarianza dei giudizi di causalità di  $A$  su  $B$  rispetto al fattore  $u_A$ , per ciascuno dei tre livelli del rapporto di massa abbiamo condotto un'analisi di regressione logistica sui giudizi di naturalezza con i predittori  $u_A$  e  $C$ . L'effetto di  $u_A$  non è statisticamente significativo nel caso di  $m_A < m_B$  ( $p = .391$ , odds ratios = 1.11), e nel caso di  $m_A > m_B$  ( $p = .858$ , odds ratios = 0.979). E' invece significativo nel caso di  $m_A = m_B$  ( $p = .034$ , odds ratios = 0.771). In generale, i risultati indicano una sostanziale invarianza dei giudizi di causalità rispetto a  $u_A$ . L'effetto di  $C$  è sempre statisticamente significativo ( $ps < .001$ ), e di forza confrontabile nelle tre condizioni (odds ratios 0.232, 0.236, 0.266 per  $m_A < m_B$ ,  $m_A = m_B$ , e  $m_A > m_B$  rispettivamente).

Per testare l'invarianza dei giudizi di causalità rispetto al rapporto di massa, per ciascuno dei due livelli di  $u_A$  abbiamo condotto un'analisi di regressione logistica sui giudizi di causalità di  $A$  su  $B$  con i predittori i tre livelli del rapporto di massa e  $C$ . L'effetto del rapporto di massa era statisticamente significativo per  $u_A = 7.5$  cm/s ( $p = .002$ ), ma non per  $u_A = 15$  cm/s ( $p = .736$ ). Quando  $u_A = 7.5$  cm/s, odds ratio ( $m_A = m_B$  vs  $m_A < m_B$ ) = 1.50 e odds ratio ( $m_A > m_B$  vs  $m_A < m_B$ ) = 1.08. Quando  $u_A = 15$  cm/s, odds ratio ( $m_A = m_B$  vs  $m_A < m_B$ ) = 1.08.

$m_B$ ) = 1.04, e odds ratio ( $m_A > m_B$  vs  $m_A < m_B$ ) = 0.95. L'effetto di  $C$  sui giudizi di causalità è statisticamente significativo ( $p < .001$ ) e di forza simile per i due livelli di velocità pre-collisione di  $A$  (odds ratio = 0.240 e 0.252 per  $u_A = 7.5$  cm/s e  $u_A = 15$  cm/s rispettivamente). Il fatto che il rapporto di massa sembri avere un effetto sui giudizi di causalità per un solo livello di velocità, consente di concludere che, nel loro complesso, i giudizi di causalità di  $A$  su  $B$  sono relativamente invariati rispetto al rapporto di massa.

*Esperimento sul giudizio di causalità di B su A:* in figura 11 sono mostrati i grafici che rappresentano l'influenza dei tre fattori sperimentali sulle risposte dei soggetti.





**Figura 11.** I grafici mostrano l'influenza dei fattori sperimentali sulle risposte dei soggetti nell'esperimento sul giudizio di causalità di B su A.

L'ispezione dei grafici mostra una differenza rilevante rispetto all'esperimento di causalità di *A su B*. Nella condizione  $m_A < m_B$ , tutti i valori di *C* nel range che va da 0.3 a 0.9 danno origine a giudizi di causalità molto elevati, mentre nel caso dei giudizi di causalità di *A su B* si registrava un graduale incremento della probabilità di risposta causale entro quel range. Sembra invece esserci una tendenza opposta per  $m_A > m_B$ . Questo potrebbe indicare che, al di là del realismo fisico dell'animazione, la presenza di un rimbalzo all'indietro del quadrato *A* sia una condizione che favorisce la percezione di un rapporto causale da *B* a *A*.

Per testare l'invarianza dei giudizi di causalità di *B su A* rispetto al parametro  $u_A$ , per ciascuno dei tre livelli del rapporto di massa abbiamo condotto un'analisi di regressione logistica sui giudizi di naturalezza con i predittori  $u_A$  e *C*. L'effetto di  $u_A$  non è statisticamente significativo: per  $m_A < m_B$  abbiamo  $p = .05$  (odds ratios = 0.780), per  $m_A = m_B$  abbiamo  $p = .755$  (odds ratios = 0.962) e per  $m_A > m_B$  abbiamo  $p = .858$  (odds ratios = 0.979). È invece significativo nel caso di  $m_A = m_B$  con  $p = .252$  (odds ratios = 0.871). In generale, i risultati indicano invarianza dei giudizi di causalità *B su A* rispetto a  $u_A$ . L'effetto di *C* è sempre statisticamente significativo ( $ps < .001$ ), e di forza confrontabile nelle tre condizioni (odds ratios 0.209, 0.225, 0.295 per  $m_A < m_B$ ,  $m_A = m_B$  e  $m_A > m_B$  rispettivamente).

Per testare l'invarianza dei giudizi di causalità di *B su A* rispetto al rapporto di massa, per ciascuno dei due livelli di  $u_A$  abbiamo condotto un'analisi

di regressione logistica sui giudizi di causalità con i predittori rapporto di massa e  $C$ . L'effetto del rapporto di massa era statisticamente significativo sia per  $u_A = 7.5$  cm/s ( $p < .001$ ), sia per  $u_A = 15$  cm/s ( $p < .001$ ). Quando  $u_A = 7.5$  cm/s, odds ratio ( $m_A = m_B$  vs  $m_A < m_B$ ) = 1.04 e odds ratio ( $m_A > m_B$  vs  $m_A < m_B$ ) = 0.67. Quando  $u_A = 15$  cm/s odds ratio ( $m_A = m_B$  vs  $m_A < m_B$ ) = 1.28, e odds ratio ( $m_A > m_B$  vs  $m_A < m_B$ ) = 0.722. L'effetto di  $C$  sui giudizi di causalità era statisticamente significativo ( $p < .001$ ) e di forza simile per i due livelli di velocità pre-collisione di  $A$  (odds ratio = 0.251 e 0.233 per  $u_A = 7.5$  cm/s e  $u_A = 15$  cm/s rispettivamente).

I risultati confermano quanto detto all'inizio, cioè a parità di altri fattori, era nettamente più probabile percepire una relazione causale da  $B$  ad  $A$  quando  $m_A < m_B$  o  $m_A = m_B$  rispetto a quando  $m_A > m_B$ . Questo suggerisce che il rimbalzo all'indietro del quadrato  $A$  è un importante indizio di causalità da  $B$  ad  $A$ .



## CAPITOLO 4

### Discussione e conclusioni

La presente ricerca si è focalizzata sullo studio delle collisioni orizzontali, articolata in tre esperimenti su campioni formati da 34, 30 e 30 partecipanti, rispettivamente. In particolare, nei tre esperimenti venivano mostrate una serie di 156 stimoli raffiguranti delle collisioni orizzontali simulate tra due quadrati (*A* e *B*) animati al computer (Vedi paragrafo 3.3). Il numero di stimoli viene prodotto da un disegno fattoriale 3 (rapporti di massa) x 2 (*uA*) x 13 (*C*) x 2 (ripetizioni) (Vedi paragrafo 3.2). I tre esperimenti si differenziavano per il tipo di compito richiesto ai soggetti: nel primo esperimento ai soggetti veniva chiesto di giudicare se le collisioni negli stimoli apparivano come *naturali* o *innaturali*; nel secondo esperimento ai soggetti veniva chiesto di giudicare se il movimento di *B* veniva *causato* o *non causato* dall'impatto con *A*; nel terzo esperimento ai soggetti veniva chiesto di giudicare se il movimento di *A* veniva *causato* o *non causato* dall'impatto con *B*.

Nella fase preliminare della ricerca sono stati sviluppati tre modelli con lo scopo di formulare previsioni sui giudizi dei soggetti riguardo le collisioni mostrate negli stimoli. I modelli sono stati sviluppati sulla base delle tre concezioni teoriche sulle collisioni orizzontali discusse nel capitolo 1. Tali modelli si basano sull'assunto che, per ciascuna collisione, l'osservatore formuli un giudizio implicito di naturalezza o causalità che si esprime su una scala

continua che va da 0 a 1, in cui 0 è del tutto innaturale o non causale mentre 1 è del tutto naturale o causale. Dal giudizio implicito si passa al giudizio esplicito attraverso una semplice regola di risposta, per cui l'osservatore risponde naturale o causale quando il giudizio implicito supera una certa soglia. Per un discussione sui tre modelli si veda il capitolo 2.

L'obiettivo è quello di testare l'accordo tra le previsioni dei tre modelli e le risposte dei soggetti, ovvero quale modello rappresenti al meglio le risposte dei soggetti in ciascuno dei tre esperimenti. I dati sui quali è stato calcolato l'accordo osservatore-modello sono le risposte soggettive aggiustate dopo l'applicazione del modello di stima della manica e le previsioni di ciascun modello sulla probabilità che una certa situazione-stimolo venga percepita come "*naturale*" o "*causata*", come mostrano le figure 2-6 nel Capitolo 2.

In tutti e tre gli esperimenti è stato trovato un livello di accordo, espresso in termini di  $\kappa$  di Cohen, di poco superiore a 0.5 per il modello *Newtonian observer* (Vedi paragrafo 2.2.1) e per il modello *Heuristic observer* (Vedi paragrafo 2.2.2), con un accordo del 79% e 78%, rispettivamente. Le analisi hanno mostrato come il modello newtoniano ed il modello euristico abbiano entrambi una buona performance nel prevedere i giudizi dei soggetti in tutti e tre gli esperimenti, mentre il modello *Michottean observer* (Vedi paragrafo 2.2.3) ha una performance nettamente peggiore rispetto agli altri due modelli in tutti e tre gli esperimenti. Questi risultati mettono in evidenza che i soggetti tendono ad

utilizzare lo stesso modello di risposta a prescindere dal tipo di giudizio richiesto.

Dai risultati ottenuti è difficile discriminare tra il modello newtoniano e quello euristico, l'adesione dei partecipanti quasi equivalente a questi due modelli non ci permette di trarre conclusioni forti riguardo quale modello abbia la performance migliore. Le risposte dei soggetti possono essere descritte sia dal modello newtoniano che da quello euristico, questo potrebbe significare che i partecipanti hanno una buona adesione e coerenza con le leggi fisiche nel giudizio e nella valutazione delle collisioni orizzontali, allo stesso tempo potrebbero entrare in gioco delle violazioni delle leggi fisiche come previsto dal modello euristico. Anche dopo aver assegnato ad ogni partecipante il modello di risposta preferito ( i.e il modello con valore di  $\kappa$  più alto per un soggetto, solo nel caso in cui il valore più grande di  $\kappa$  risulti maggiore di 0.4) si nota una lieve preferenza per il modello Newtoniano, che viene preferito da 54 soggetti sul totale dei tre esperimenti, mentre 33 mostrano una preferenza per il modello euristico. Questa somiglianza tra le performance e preferenza del modello Newtoniano e modello euristico potrebbe essere dovuta alla simile distribuzione delle priors dei due modelli, sulla base delle quali il modello euristico fa previsioni diverse rispetto al modello newtoniano solamente per tre valori di  $C$  (1.2, 1.5, 1.8).

Si può invece affermare con convinzione che i soggetti non si affidino al modello michottiano nel formulare i loro giudizi sulle collisioni. Questo dato è in

linea con quanto viene affermato in letteratura, Choi e Scholl (2006) sostengono che i giudizi espliciti sono influenzati non solamente dall'impressione visiva dei soggetti ma anche da processi cognitivi di alto livello, perciò la conoscenza e l'esperienza possono influenzare i giudizi espliciti sulla naturalezza e causalità nelle collisioni orizzontali incentivando una elaborazione cognitiva a scapito di un'impressione visiva. Questo potrebbe spiegare la scarsa performance del modello michottiano che basa le sue previsioni sull'impressione visiva generata quando la scena viene percepita dall'osservatore come un movimento unico che parte da *A* e passa a *B*, così come postulato da Michotte nell'ampliation of movement. Quando viene presentata una collisione, il soggetto può avere un'immediata impressione visiva che il movimento di un quadrato sia generato dall'impatto con l'altro, ma nel momento in cui deve esplicitare il giudizio questo viene influenzato dalle conoscenze sulle leggi fisiche, interiorizzate e coerenti oppure semplificate tramite delle euristiche, che prevalgono sull'impressione visiva.

Le previsioni del modello newtoniano e del modello euristico sono basate sul coefficiente di restituzione, il quale è l'unico parametro secondo il quale è possibile discriminare tra collisioni fisicamente possibili e fisicamente impossibili. Ricordiamo che i valori che il coefficiente di restituzione può assumere senza violare la legge di conservazione dell'energia sono compresi tra 0 e 1 (vedi paragrafo 2.1.1). Se l'ipotesi alla base del modello newtoniano fosse vera, quindi che le leggi fisiche sono interiorizzate, le previsioni di tale modello dovrebbero raggiungere un valore di accordo vicino al 100%. Come



detto in precedenza il modello newtoniano prevede il 79% delle risposte dei partecipanti. Pur essendo elevato, tale valore lascia intendere che i giudizi dei partecipanti sulle collisioni non sono guidati esclusivamente dal valore del coefficiente di restituzione ma che ci sia un'influenza anche di altri fattori, come la velocità pre-collisione di  $A$  e del rapporto di massa. Le analisi della regressione logistica condotte per ognuno dei tre esperimenti hanno messo in risalto l'influenza di questi fattori sperimentali sui giudizi dei soggetti.

In particolare, per l'esperimento sulla naturalezza una collisione ha maggior probabilità di essere giudicata come naturale quando  $m_A = m_B$ , mentre la probabilità diminuisce quando  $m_A > m_B$ ; per quanto riguarda la velocità post-collisione di  $A$  abbiamo una minore probabilità di giudicare una collisione come naturale quando  $u_A = 15$  cm/s, rispetto a quando  $u_A = 7.5$  cm/s. Le combinazioni di valori che sfavoriscono maggiormente la naturalezza di una collisione sono quelle che portano ad avere una velocità post-collisione di  $B$  elevata, questo significa che alcuni partecipanti potrebbero basare i propri giudizi di naturalezza sul valore della velocità post-collisione di  $B$  e non esclusivamente sul coefficiente di restituzione. Gli esperimenti futuri potrebbero concentrarsi maggiormente sull'influenza della velocità post-collisione sui giudizi di naturalezza, così da poter testare l'inferenza fatta sulla base dei risultati.

L'esperimento di causalità di  $A$  su  $B$ , mostra invece che l'influenza di  $u_A$  sui giudizi dei partecipanti è trascurabile, ed il rapporto di massa risulta e

essere significativo solamente per  $u_A = 7.5$  cm/s. Anche se l'invarianza non è completa i giudizi di causalità risultano essere meno influenzati dalla velocità pre-collisione di  $A$  e dai rapporti di massa.

L'esperimento di causalità di  $B$  su  $A$  sono simili a quelli dell'esperimento precedente per quanto riguarda l'influenza di  $u_A$ , mentre l'influenza del rapporto di massa risulta essere significativa per entrambi i livelli di  $u_A$ , infatti è nettamente più probabile percepire una relazione causale da  $B$  ad  $A$  quando  $m_A < m_B$  o  $m_A = m_B$  rispetto a quando  $m_A > m_B$ . Com'è possibile notare dalle formule (vedi paragrafo 3.2), a parità di altri fattori, nelle collisioni con rapporto di massa  $m_A < m_B$  o  $m_A = m_B$  il quadrato  $A$  tende a rimbalzare all'indietro dopo il contatto con  $B$ , nelle collisioni con rapporto di massa  $m_A > m_B$  il quadrato  $A$  continua la sua corsa in avanti anche dopo l'impatto con  $B$ . Il rimbalzo all'indietro di  $A$  potrebbe essere usato dai soggetti come un indizio di causalità, in quanto rende l'effetto di  $B$  su  $A$  maggiormente visibile mettendo in evidenza una sorta di ragionamento euristico nel giudizio della causalità in questo esperimento.

## BIBLIOGRAFIA

- Andersson, I. E., & Runeson, S. (2008). Realism of confidence, modes of apprehension, and variable-use in visual discrimination of relative mass. *Ecological psychology, 20*(1), 1-31.
- Choi, H., & Scholl, B. J. (2006). Measuring causal perception: Connections to representational momentum? *Acta Psychologica, 123*, 91–11.
- Cohen, A. L., & Ross, M. G. (2009). Exploring mass perception with Markov chain Monte Carlo. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 35*(6), 1833.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction, 10*(2-3), 105-225.
- Gilden, D. L. (1991). On the origins of dynamical awareness. *Psychological Review, 98*(4), 554.
- Kubricht, J. R., Holyoak, K. J., & Lu, H. (2017). Intuitive physics: Current research and controversies. *Trends in Cognitive Sciences, 749-759*.

- McCloskey, M. (1983). Intuitive physics. *Scientific American*, 248(4), 122-131.
- Michotte, A. (1963). The perception of causality. *London: Methuen*.
- Nucci, M., Spoto, A., Altoè, G., Pastore, M. (2021). The role of raters threshold in estimating inter-rater agreement. *Psychological Methods*, 26, 622-634.
- Proffitt, D. R., & Gilden, D. L. (1989). Understanding natural dynamics. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(2), 384.
- Runeson, S., & Frykholm, G. (1983). Kinematic specification of dynamics as an informational basis for person and action perception: Expectation, gender, recognition, and deceptive intentions. *Journal of Experimental Psychology: General*, 112(4), 585.
- Runeson, S., Juslin, P., & Olsson, H. (2000). Visual perception of dynamic properties: cue heuristics versus direct-perceptual competence. *Psychological review*, 107(3), 525.

- Runeson, S., & Vedeler, D. (1993). The indispensability of precollision kinematics in the visual perception of relative mass. *Perception & Psychophysics*, 53(6), 617-632.
- Sanborn, A. N., Mansinghka, V. K., & Griffiths, T. L. (2013). Reconciling intuitive physics and Newtonian mechanics for colliding objects. *Psychological Review*, 120(2), 411.
- Shepard, R. N. (1984). Ecological constraints on internal representation: Resonant kinematics of perceiving, imaging, thinking, and dreaming. *Psychological Review*, 91.
- Shepard, R. N. (1994). Perceptual-cognitive universals as reflections of the world. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1(1), 2-28.
- Todd, J. T., & Warren, W. H., Jr. (1982). Visual perception of relative mass in dynamic events. *Perception*, 11, 325–335.
- Twardy, C. R., & Bingham, G. P. (2002). Causation, causal perception, and conservation laws. *Perception & Psychophysics*, 64(6), 956-968.
- Vicovaro, M. (2012). Intuitive physics of collision effects on simulated spheres differing in size, velocity, and material. *Psicológica*, 33, 451-471.

- Vicovaro, M. (2018). Causal reports: Context-dependent contribution of intuitive physics and visual impressions of launching. *Acta Psychologica*, 186, 133-144.
- Vicovaro (2021), Intuitive physics and cognitive algebra: A review. *European Review of Applied Psychology*, Volume 71, 100610.
- Vicovaro, M., & Burigana, L. (2014). Intuitive understanding of the relation between velocities and masses in simulated collisions. *Visual Cognition*, 22, 896-919.
- Vicovaro, M., & Burigana, L. (2016). Intuitive understanding of the relationship between the elasticity of objects and kinematic patterns of collisions. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78, 618-635.
- Wagemans, J., van Lier, R., & Scholl, B. J. (2006). Introduction to Michotte's heritage in perception and cognition research. *Acta Psychologica*, 123(1-2), 1-19.
- White, P. A. (2006a). The role of activity in visual impressions of causality. *Acta Psychologica*, 123(1-2), 166-185.

