

# Dalla freccia di Lucrezio all'argomento EPR: alcune considerazioni sul ruolo degli esperimenti mentali in scienza

Mauro Dorato  
Dipartimento di Filosofia  
Università degli Studi "Roma 3"  
Via Ostiense 234, I-00146, Roma  
dorato@uniroma3.it

## §1 Introduzione: che cos'è un esperimento mentale?

Allorché Lucrezio, nel suo *De Rerum Natura*, si domandava che cosa sarebbe accaduto se avessimo provato a scagliare un dardo contro l'estremo limite dell'universo finito aristotelico,<sup>1</sup> ereditava una ricchissima tradizione della filosofia greca, che affidava a quelli che oggi chiamiamo *esperimenti mentali* il compito di portare argomenti a favore o contro una certa tesi. Ma che cosa sono, esattamente, gli esperimenti mentali? E come può un esperimento *solo immaginato* conferire qualche tipo di evidenza a un'ipotesi sul mondo fisico?

Per rispondere alla prima di queste due domande, vorrei iniziare con il sottoscrivere la seguente semplice definizione di Gendler la quale, pur nella sua generalità, mette in luce in modo abbastanza chiaro quello che è lo scopo fondamentale della realizzazione di un esperimento mentale: «I will assume that to perform a *thought experiment* is to reason about an imaginary scenario with the aim of confirming or disconfirming some hypothesis or theory, and that to perform a *scientific thought experiment* is to reason about an imaginary scenario with the aim of confirming or disconfirming some hypothesis or theory *about the physical world*.» (Gendler 2004, p.1154).

---

<sup>1</sup> «E inoltre, supponiamo ora che tutto lo spazio esistente/sia limitato e che qualcuno corra avanti, all'estrema riva, spingendosi fino all'ultimo punto, e scagli un dardo volante:/preferisci tu pensare che esso, lanciato con valide forze,/vada ove è stato vibrato e voli lontano,/o credi che qualcosa possa arrestarlo e ad esso opporsi?/O l'una o l'altra ipotesi occorre infatti che tu ammetta e scelga./Ma sia l'una che l'altra ti preclude ogni via di scampo/e ti obbliga a riconoscere che il tutto si estende senza confine.» (<http://www.filosofico.net/rerumnatura.htm#n2>)

Si potrebbe pensare che la locuzione stessa “esperimento *mentale*” (*Gedankenexperiment*, *Thought Experiment*) presupponga la possibilità di tracciare un’esplicita distinzione tra *esperimento reale* ed *esperimento mentale*, e dunque l’affermarsi di quella solida tradizione sperimentale che convenzionalmente si fa coincidere con la nascita della scienza moderna.<sup>2</sup> Da questo punto di vista, diverrebbe corretto parlare di esperimenti mentali solo a partire dal Seicento. In realtà, il ricorso a esperimenti mentali nel senso così generale di Gendler risale a ben prima di Galileo – che pure ne fece un uso abbondante e straordinario – visto che era diffusissimo nel mondo greco: si pensi all’argomento di Zenone che, allo scopo di provare l’impossibilità del moto, ci chiede di immaginare una freccia che, ad ogni istante di tempo durante il suo apparente tragitto, occupa in realtà un intervallo spaziale identico alla sua lunghezza, e deve perciò risultare *ferma*. Il carattere mentale dell’esperimento e il ricorso all’immaginazione è indubitabile, dato che durante il suo moto la freccia non ci sembra affatto ferma. L’esperimento è mentale perché ci si chiede di immaginare di rendere sempre più piccolo l’intervallo di tempo tra istante iniziale dell’intervallo e istante finale, fino a farli coincidere: al limite la freccia occuperà un luogo spaziale identico al suo volume e sarà quindi immobile.

La tesi principale che vorrei difendere in questo saggio è che *gli esperimenti mentali si sono spesso rivelati uno straordinario strumento per indagare nei fondamenti delle scienze naturali, ovvero per evidenziare la tenuta e la stabilità di concetti apparentemente chiari e invece potenzialmente contraddittori, che pure stavano alla base di teorie scientifiche condivise in un certo periodo storico.*

Il saggio è organizzato come segue. Nella prossima sezione cercherò di presentare alcuni esempi famosi di esperimenti mentali scientifici, con l’intento di mostrare che essi hanno invariabilmente giocato un ruolo estremamente importante non solo e non tanto da un punto di vista pedagogico ed euristico, ma soprattutto come *motori delle maggiori rivoluzioni scientifiche*: non è un caso che coloro che ne produssero con maggior abbondanza e acutezza furono forse Galileo ed Einstein. Ed è per questo motivo che ritengo che colui che sia andato più vicino al vero

---

<sup>2</sup> A quanto sembra, il primo a usare il termine *Gedankenexperiment* fu Lichtenberg (1742-1799)

su ciò che storicamente è stato il ruolo degli esperimenti mentali sia stato ancora una volta Thomas Kuhn, che già più di 40 anni fa scriveva: « l'esperimento mentale è uno degli strumenti analitici che vengono utilizzati durante la crisi [rivoluzionaria]<sup>3</sup> e che quindi aiutano a promuovere le riforme concettuali fondamentali. Il risultato degli esperimenti mentali può essere lo stesso delle rivoluzioni scientifiche: essi possono far sì che lo scienziato sia in grado di utilizzare, come parte integrante della sua conoscenza, ciò che quella conoscenza aveva precedentemente reso inaccessibile a lui. Questo è il senso nel quale essi cambiano la sua conoscenza del mondo» (Kuhn 1964, p. 125)

Diventa allora importante domandarsi – cosa che farò nella terza sezione – su quale base essi possono avere questa rivoluzionaria funzione, domanda che nel dibattito recente ha preso una piega diversa rispetto a quella originariamente impressagli da Kuhn. Mentre per Kuhn, come vedremo, è impossibile separare la componente concettuale da quella empirica fornita da un esperimento mentale, nel dibattito recente ci si è domandati invece se gli esperimenti mentali siano strumenti quasi-percettivi (non-proposizionali) atti a scoprire *a priori* astratte leggi di natura – come sostiene Brown (1991, 2004) – oppure se abbiano la struttura proposizionale tipica di *argomenti*, e quindi possiedano una base empirica e non *a priori* (Norton 2004). “A priori” per Brown significa sia che l'esperimento mentale non è né basato su nuova evidenza empirica, né su una deduzione logica da dati già disponibili.

## 2 Alcuni esempi famosi di esperimenti mentali: un tentativo di classificazione

Il breve elenco che segue basterà a convincerci che esperimenti mentali vennero proposti dai più grandi fisici dell'epoca moderna, e che come tali essi hanno avuto sia un'indubitabile funzione *euristica* che un essenziale valore *critico*, nel senso che sono serviti a indagare e a porre sotto esame, nonché rendere esplicite, le assunzioni nascoste delle teorie fisiche. L'analisi un po' più dettagliata dell'esperimento mentale proposto da Einstein nel 1927 alla V conferenza Solvay avrà

---

<sup>3</sup> Mia aggiunta.

lo scopo di illustrare il senso preciso in cui un esperimento mentale chiama in causa i *fondamenti* delle teorie fisiche.<sup>4</sup> Oltre a illustrare l'importanza che gli esperimenti mentali hanno avuto nella storia della scienza, il breve elenco che segue, che non aspira certo alla completezza, suggerisce una prima forma di classificazione di esperimenti mentali scientifici.

Non possiamo non iniziare con i gravi di Galileo, che probabilmente furono lanciati solo con il pensiero dalla Torre di Pisa<sup>5</sup>, e che servivano a illustrare il fatto che la velocità di caduta è proporzionale al tempo di caduta e non al peso. L'argomento di Galilei, che è una *reductio ad absurdum*, è così ricostruibile: se due sfere di massa diversa e composte di ugual materiale (una palla di cannone e un proiettile) cadessero come dice Aristotele con velocità diversa, sarebbe possibile legarle una all'altra e ricavare la seguente contraddizione *anche senza fare l'esperimento*. In base alla teoria di Aristotele, seguirebbe infatti sia che (i) la sfera leggera, essendo più lenta dell'altra, dovrebbe rallentare quella pesante perché è ad essa legata, sia che (ii) le due sfere legate insieme dovrebbero cadere più rapidamente della sfera pesante considerata da sola, dato che le due sfere legate pesano di più di quella pesante. Si esce dalla contraddizione generata dall'esperimento mentale negando la premessa aristotelica che la velocità di caduta dipenda dal peso (Galileo 1638, p. 107-108).

Si noti che in questo esempio l'esperimento è mentale non perché non sia realizzabile (si possono gettare dalla torre sfere di peso diverso), ma *perché se lo si realizzasse esso non mostrerebbe esattamente ciò che intende mostrare*. Questo tipo di esperimento mentale serve a collocarci in una dimensione idealizzata: visto che è solo con il pensiero che possiamo rimuovere la resistenza dell'aria, l'esperimento mentale stesso è di fatto una specie di "simulazione idealizzata". In linguaggio alternativo, questo esperimento mentale ci chiede di porci in un mondo possibile, o in un modello del mondo fisico diverso dall'attuale, perché, "defalcando gli impedimenti della materia", come diceva Galileo, abbiamo rimosso la resistenza dell'aria. Si noti

---

<sup>4</sup> È questione meno indagata se gli esperimenti mentali abbiano luogo al di fuori della fisica (e della filosofia).

<sup>5</sup> Secondo la testimonianza del biografo di Galilei Vincenzo Viviani, tra il 1590 e il 1591, Galileo effettuò effettivamente alcuni esperimenti sulla caduta dei gravi dalla sommità della Torre di Pisa. Il fatto che l'esperimento dei gravi sia da noi classificato come mentale non dipende dall'accertamento di questo dubbio fatto biografico.

che tale mondo possibile potrebbe corrispondere a una regione del nostro mondo fisico in cui non ci sia aria; quindi l'esperimento è fisicamente possibile, perché non viola alcuna legge fisica nota, anzi, serve a scoprirla costruendo una realtà controfattuale, o lontana da quella della nostra esperienza. Ritengo che sia questa natura apparentemente controintuitiva o "e non-osservativa" della fisica galileiana che fa dire ad alcuni filosofi della scienza contemporanei (Brown, Arthur) che gli esperimenti mentali *non* traggono la loro forza evidenziale dall'esperienza, ma costituiscono una forma di conoscenza a priori.

Un altro famoso esempio è dato – più che dal secchio rotante di cui parla Newton nei *Principia* (l'esperimento in quel caso, stando a ciò che dice Newton, fu effettivamente realizzato) – dalle due sfere da lui immaginate come isolate da tutti gli altri corpi, e tenute insieme solo da una corda, che con la sua tensione servirebbe a mostrare l'assolutezza del moto rotatorio. Anche in questo caso, il mondo possibile in questione potrebbe essere un luogo del nostro mondo molto lontano da sorgenti gravitazionali e anche da osservatori. Anche qui, l'esperimento mentale in questione non costruisce mondi fisicamente impossibili, ma impone solo condizioni estremamente idealizzate, e assomiglia quindi al primo tipo di esperimento. Anche in questo esempio gli osservatori infatti possono solo immaginare ciò che vedrebbero, visto che se si avvicinassero violerebbero con le loro masse alcune delle condizioni necessarie per la realizzazione dell'esperimento. Possiamo chiamare esperimenti mentali di questi due tipi *esperimenti controfattuali*, nel senso che, senza violare leggi note, essi ci chiedono di porci con il pensiero in mondi fisicamente possibili diversi dall'attuale.

Come si diceva sopra, il carattere controfattuale di questi due esperimenti mentali sembra anche costituire un argomento a favore della natura *non empirica* della conoscenza fornita da essi. Si tratta di capire però se la tesi aprioristica potrebbe essere riconciliata con quella argomentativa-empirica sostenendo che il metodo aprioristico funziona solo nel contesto della scoperta, mentre in quello della giustificazione vale la concezione "empirista" degli esperimenti mentali.

Il terzo caso che vorrei esaminare è quello costituito dal cosiddetto diavoleto di Maxwell, che riesce a separare le molecole calde da quelle fredde di un gas dopo che queste sono state miscelate e il gas ha raggiunto l'equilibrio termico, facendo passare le molecole più veloci (e quindi più calde) attraverso uno sportellino e lasciando le più fredde dall'altra parte.<sup>6</sup> Lo scopo del diavoleto è quello di invertire il corso naturale delle cose, rompendo l'universale tendenza verso l'equilibrio termico (e l'aumento entropico) che si realizza miscelando due gas a temperature diverse.

Si noti che, almeno nella formulazione originale di Maxwell, la postulazione del suo diavoleto implica immaginare una situazione che va contro delle leggi di natura, segnatamente il secondo principio della termodinamica, perché il diavoleto riesce a separare le molecole più calde da quelle più fredde dall'altra dopo che queste hanno raggiunto l'equilibrio termico, e dunque a far scendere l'entropia di un sistema isolato. E questo non perché non sia possibile che le molecole di un gas "spontaneamente", ma nel corso di un lunghissimo periodo di tempo, non si separino di nuovo in "calde" e "fredde" ritornando alla posizione iniziale (c'è anzi un teorema, quello di ricorrenza di Poincaré, che prescrive che nei sistemi isolati questo debba accadere), ma perché nel caso in questione il diavoleto di Maxwell compie la sua opera di separazione di molecole calde e molecole fredde senza trarre energia o informazione dall'ambiente, ovvero senza compiere lavoro, ciò che, come chiarirono nella prima parte del secolo scorso Szilárd e Brillouin, è *fisicamente impossibile*.

Si noti che esempi come questo sembrano indebolire le tesi di coloro che, come Brown (1991, 2004), sostengono che gli esperimenti mentali sono forme di quasi-percezione diretta nella struttura astratta delle leggi di natura, o "sguardi nel paradiso platonico" (*Peeks into Plato's*

---

<sup>6</sup> ... if we conceive of a being whose faculties are so sharpened that he can follow every molecule in its course, such a being, whose attributes are as essentially finite as our own, would be able to do what is impossible to us. For we have seen that molecules in a vessel full of air at uniform temperature are moving with velocities by no means uniform, though the mean velocity of any great number of them, arbitrarily selected, is almost exactly uniform. Now let us suppose that such a vessel is divided into two portions, A and B, by a division in which there is a small hole, and that a being, who can see the individual molecules, opens and closes this hole, so as to allow only the swifter molecules to pass from A to B, and only the slower molecules to pass from B to A. He will thus, *without expenditure of work*, raise the temperature of B and lower that of A, in contradiction to the second law of thermodynamics. (Maxwell 1871, p. 4, mio corsivo).

*Heaven*) come si intitola il suo recente saggio sul tema, a meno di non sostenere che esperimenti mentali contronomici (che vanno cioè contro leggi di natura note) servano a difendere le leggi già note da possibili critiche. In fondo, qualche decennio dopo Maxwell, Brillouin e Szilard hanno mostrato come anche il diavoleto deve interagire con le molecole in qualche modo compiendo lavoro che aumenta l'entropia complessiva del sistema.

È di fondamentale importanza tener presente che il fatto che un esperimento mentale sia di tipo controfattuale, come i due precedenti, o, come l'ultimo, addirittura contronomico, perché viola una legge nota, non toglie loro nessuna forza. Anzi. Il senso di ideare un esperimento mentale sta proprio nel proporre una situazione che, almeno nel momento in cui viene proposta, può essere solo *immaginata* con il pensiero. Si tratta allora di spiegare come una situazione controfattuale o contronamica, e dunque solo immaginata, possa riuscire a farci comprendere meglio le conseguenze dei concetti con i quali cerchiamo di inquadrare i fenomeni naturali del mondo *attuale* nel quale viviamo. È questo uno dei maggiori problemi filosofici posti dagli esperimenti mentali e può essere solo compreso tenendo conto del fatto che i modelli matematici del mondo fisico presentano inevitabilmente aspetti idealizzati e semplificati rispetto alla complessità del mondo reale: modelli in cui l'attrito è assente, le molecole dei gas non si attraggono e i liquidi non hanno viscosità (Dorato 2000)

Arrivando al Novecento, il protagonista non può che diventare Einstein, che era un vero maestro nell'arte di escogitare esperimenti mentali. L'arcinoto viaggio a cavallo del raggio di luce fu importante sul cammino verso la relatività speciale, perché mostrò ad un Einstein sedicenne che la velocità della luce non può essere dipendente dalla velocità della sorgente, come richiederebbe la teoria emissiva della luce con la quale Einstein si baloccò prima di formulare la relatività speciale.<sup>7</sup> Poiché se fossimo a cavallo di un raggio di luce, l'onda ci sembrerebbe stazionaria, sulla base della teoria emissiva una sorgente che si allontanasse da noi con velocità *pari a quella della luce* emetterebbe onde stazionarie, che noi invece non osserviamo mai (Norton 2004).

---

<sup>7</sup> «Dopo anni di riflessione, un siffatto principio [universale] risultò da un paradosso nel quale mi ero imbattuto all'età di sedici anni: se io potessi seguire un raggio di luce a velocità  $c$  (la velocità della luce nel vuoto), il raggio di luce mi apparirebbe come un campo elettromagnetico oscillante nello spazio, in stato di quiete.» (Einstein 1949, p. 86).

*Con il senno del poi*, sappiamo che nella formulazione letterale che ne diede Einstein, inseguire e raggiungere un raggio di luce è un esperimento fisicamente impossibile, perché comporta l'accelerazione fino alla velocità della luce di un corpo dotato di massa, quello di Einstein stesso. Ma ai tempi di Einstein, e sulla base della teoria emissiva della luce, osservare campi stazionari avrebbe dovuto essere non solo fisicamente possibile ma addirittura non infrequente, nella misura in cui è frequente il fatto che qualche sorgente luminosa si allontani da noi con quella velocità. Questo mostra che la classificazione di un esperimento mentale come controfattuale (ovvero, come i primi due che abbiamo presentato, “possibile in un mondo fisico compatibile con le leggi note ma diverso dal nostro”), ovvero contronómico (ovvero tale che, come gli ultimi due da noi elencati, sia fisicamente impossibile da realizzarsi) può dipendere dal contesto storico-epistemico in cui ci troviamo, ovvero dal tipo di teoria che presupponiamo corretta.<sup>8</sup> E, come vedremo, si dà anche il caso che un esperimento prima solo mentale si trasformi in un esperimento reale.

Questa considerazione mostra la possibile dipendenza di ciò che consideriamo “mentale” dal contesto conoscitivo complessivo che presupponiamo in ogni epoca storica. Dico “possibile” perché un esperimento che ci rendesse così piccoli da poter osservare direttamente un quark sarebbe sempre e solo mentale, perché alle dimensioni di un quark non potremmo osservare con i *nostri occhi* una particella subatomica. È più che plausibile che il funzionamento di un sistema nervoso complesso come il nostro abbia bisogno di scale o dimensioni che siano svariate volte maggiori di quelle di un atomo per poter funzionare in modo affidabile.

L'altro famoso esperimento mentale proposto dal “primo motore” della fisica del Novecento è quello relativo alla caduta libera di un ascensore, che illustra il principio di equivalenza forte tra inerzia e gravitazione e che in un certo senso indebolisce la tesi prima illustrata che gli esperimenti mentali siano *solo* indagini “modali” in mondi possibili controfattuali o contronómicos. Gli occupanti di un ascensore in caduta libera in un campo gravitazionale uniforme che lasciassero

---

<sup>8</sup> Sulla dipendenza di un esperimento mentale dal contesto ha soprattutto insistito McAllister (2004).

cadere oggetti *localmente*<sup>9</sup> non potrebbero distinguere uno stato inerziale (assenza di accelerazione) dall'ipotesi di trovarsi in un campo gravitazionale in caduta libera. Tale esperimento mentale, che è alla base della costruzione della relatività generale, e che Einstein considerò il “pensiero più felice della mia vita” è, a differenza di tutti quelli precedentemente illustrati, un esperimento mentale fisicamente possibile o realizzabile. Dobbiamo dunque notare che un esperimento mentale non è necessariamente riferito a situazioni controfattuali o contronomiche, ma, sulla base della definizione presentata all'inizio, può semplicemente richiederci di *immaginare* certe situazioni a scopi argomentativi o euristici.

Se la prima funzione sopra illustrata degli esperimenti mentali è quella di aiutarci a costruire modelli semplificati dei fenomeni, e la seconda è essenzialmente euristica, quella di cui ora parleremo è essenzialmente volta alla *critica ai fondamenti*, e non consiste dunque né nell'aiutarci ad astrarre da dettagli dei fenomeni che vogliamo rappresentare in un modello, né di aiutarci a scoprire aspetti nuovi del mondo, ma semplicemente nel cercare di mettere in evidenza presupposizioni non accettabili dell'interpretazione standard di una teoria esistente.

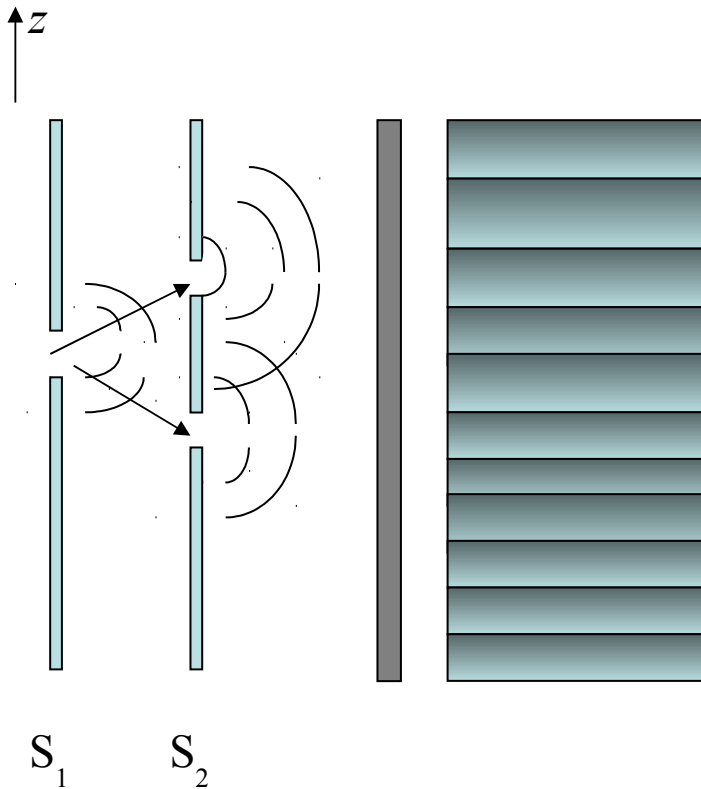
### *2.1 Gli esperimenti mentali di Einstein contro la meccanica quantistica: come si passa da un esperimento concepito a un esperimento reale*

Nel 1927, a Bruxelles, durante il V Congresso Solvay, Einstein e Bohr iniziarono quello che può essere considerato uno dei più importanti dibattiti filosofico-scientifici del Novecento sui fondamenti di una teoria fisica (la meccanica quantistica), che può essere paragonato per profondità e ricchezza di argomentazioni filosofiche all'epistolario intercorso tra Leibniz e Clarke, noto portavoce delle teorie fisico-teologiche newtoniane. Sia l'esperimento mentale che stiamo per presentare, dovuto ad Einstein, sia la risposta di Bohr, mostrano in modo più chiaro di tante teorizzazioni astratte come gli esperimenti mentali possano diventare la chiave per saggiare e mettere alla prova i fondamenti di una teoria fisica, nel nostro caso la meccanica quantistica, e dare

---

<sup>9</sup> “Localmente” significa che prima o poi gli oggetti convergono verso il centro della Terra e quindi gli oggetti in caduta accelerano reciprocamente.

origine a importanti critiche concettuali che possono trasformarsi in situazioni sperimentalmente realizzabili.



Un fascio monocromatico (con particelle di uguale impulso iniziale sparate una alla volta) investe uno schermo mobile  $S_1$ : applicando la conservazione del momento, si potrebbe determinare in quale fenditura passa la particella in  $S_2$ , senza distruggere l'interferenza. Infatti, se il primo schermo si sposta verso il basso, per la conservazione del momento la particella andrà verso la fenditura in alto di  $S_2$ , e viceversa. Si violerebbe così il principio di indeterminazione di Heisenberg, che afferma l'impossibilità di determinare simultaneamente posizione e impulso di una particella

Nell'esperimento si presuppone che sia solo l'interazione delle particelle con lo schermo mobile  $S_1$  che possa deviare la loro traiettoria, visto che prima esse avevano per ipotesi momento perpendicolare nullo nella direzione verticale ( $p_z = 0$ ). In linea di principio – *anche se praticamente è impossibile a causa della massa assai più grande dello schermo rispetto alla particella, un'impossibilità pratica che manifesta il carattere mentale dell'esperimento* – secondo Einstein è possibile misurare il rinculo dell'apparecchio mobile  $S_1$  verso l'alto o verso il basso *dopo* che la particella è passata nella sua fenditura e quindi *senza influire sul suo moto successivo*. Se si potesse misurare il rinculo di  $S_1$  sarebbe possibile prevedere per quale delle due fenditure di  $S_2$  la particella passerà, senza distruggere le figure di interferenza (vedi figura in alto).

Se l'esperimento mentale di Einstein fosse realizzabile, si potrebbe non solo calcolare il momento verticale della particella (attraverso il momento di  $S_1$ ), ma anche la sua precisa posizione, ottenibile attraverso la conoscenza di quale fenditura delle due fenditure di  $S_2$  essa attraverserà dopo il rinculo da  $S_1$ : se quest'ultimo si abbassa, la particella passa per la fenditura in alto di  $S_2$  e viceversa.

L'intento dell'esperimento mentale di Einstein era però duplice: non solo e non tanto quello di mostrare come fosse possibile falsificare il Principio di Indeterminazione di Heisenberg, che vieta l'attribuzione di una posizione e di una velocità precisa ad un corpuscolo, ma soprattutto quello di mettere in evidenza che le relazioni di indeterminazione di Heisenberg impongono relazioni di nonseparabilità tra i corpuscoli quantistici e gli apparati di misura classici.<sup>10</sup> Come vedremo, a seconda del tipo di misura che voglio eseguire sullo schermo  $S_1$ , sono costretto ad affermare o che la posizione della particella oramai lontana e in viaggio verso  $S_2$  è indefinita o che ha momento indefinito, a seconda se intendo misurare precisamente il momento verticale di  $S_1$  o la sua posizione.

La risposta di Bohr è filosoficamente degna di nota, perché anch'essa propone un esperimento mentale che cerca di ristabilire la validità del principio di indeterminazione di Heisenberg, e quindi il dualismo onda-corpuscolo, pagando tuttavia un prezzo molto alto, quello di considerare un sistema macroscopico classico come soggetto anch'esso al principio di Heisenberg alle leggi quantistiche e quindi come esso stesso soggetto alle leggi quantistiche. Per una filosofia che, come quella di Bohr, si basava su una distinzione netta tra il dominio classico e quello quantistico, questa risposta poteva aprire falle pericolose, che gli interpreti non hanno sempre notato con la dovuta attenzione.<sup>11</sup>

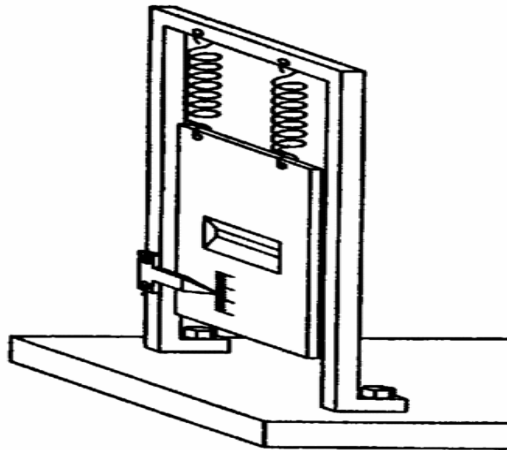
Nella sua risposta infatti, Bohr affermava che l'argomento di Einstein era destinato a generare il seguente problema. Per stabilire il verso del rinculo (in alto o in basso) e calcolare il momento del sistema complessivo schermo mobile+particella, si deve avere uno schermo  $S_1$  sospeso con

---

<sup>10</sup> Questa interpretazione è dovuta soprattutto a Laudisa (1998).

<sup>11</sup> Questo rischio è messo in evidenza da Ghirardi (1996).

molle, e si deve poter misurare con estrema precisione la componente verticale della sua velocità, quella lungo  $z$  (alto o basso). La figura qui sotto è risultato di uno scanner di quella originale di Bohr: sono evidenti le tacche graduate necessarie alla misurazione della posizione dello schermo.<sup>12</sup>



Ma allora, *a causa del principio di indeterminazione di Heisenberg* applicato al momento verticale del primo schermo, si deve avere una corrispondente indeterminatezza nella sua posizione lungo l'asse verticale  $z$ . Tale indeterminatezza equivale a fare una media su tutte le posizioni dello schermo  $S_1$  che rientrano nella indeterminazione della sua posizione, ciò che a sua volta corrisponde a fare una media su tutte le possibili figure di interferenza che corrispondono ad ogni posizione. Fare tale media comporta però distruggere la figura di interferenza, ciò che equivale a distruggere la natura ondulatoria del fenomeno complessivo.

In una parola, se lasciamo il primo schermo  $S_1$  libero di oscillare come è necessario per poter calcolare precisamente il suo momento (e quindi la *posizione* delle particelle quando attraversano il secondo schermo) per Bohr perdiamo l'effetto di interferenza. E il dualismo onda-corpuscolo è ristabilito. Come nella classica esperienza della doppia fenditura eseguita con particelle quantistiche, cercare di sapere dove sia passata la particella nello schermo  $S_2$  (attraverso il calcolo del rinculo di  $S_1$ ) distrugge l'interferenza.

---

<sup>12</sup> La figura è tratta da (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/f/f2/Ebohr3.gif>)

Si noti che l'irrealizzabilità pratica di questo esperimento mentale proposto da Einstein non è stata minimamente utilizzata da Bohr nella sua risposta. Bohr non ha infatti risposto ad Einstein, come si potrebbe essere tentati di fare: "perché occuparsi di questo esperimento mentale, visto che non è tecnicamente realizzabile?" ma ha suggerito un altro esperimento mentale che ristabilisse il paradigma in cui credeva. Bohr ha semplicemente assunto che la misurazione dell'effetto di rinculo, per poter essere davvero realizzabile dentro i margini di estrema precisione che richiedeva, *doveva coinvolgere non schermi  $S_1$  di dimensioni classiche (macroscopiche), ma schermi microscopici, o quantistici*. E a questi ultimi, di contro alla lettura critica di Ghirardi cui si accennava nella nota 11, la meccanica quantistica è applicabile.

Perché Bohr lo ha preso sul serio? La risposta a quest'ultima domanda non può aver a che fare solo con l'enorme prestigio di cui godeva Einstein nella comunità dei fisici, ma è ulteriore illustrazione del fatto che argomenti basati su esperimenti mentali sono normalmente accettati anche da coloro che, come i fisici, tipicamente basano l'affidabilità di una teoria su esperimenti reali e realizzati. E che facciano bene ad avere questo atteggiamento è mostrato dall'ultimo esperimento mentale che esamineremo, quello di EPR, visto che quest'ultimo si trasformò negli anni Ottanta del secolo scorso in una successione di esperimenti veri e propri!

Come la storiografia più avvertiva ha segnalato, la situazione sperimentale di EPR era in realtà già stata anticipata dall'esperimento mentale appena visto. Come emerse in modo più esplicito nell'articolo del 1935 scritto insieme a Podolsky e Rosen, già nel 1927 Einstein voleva infatti mettere in luce che le relazioni di indeterminazione implicano nonseparabilità o nonlocalità tra sistemi fisici spazialmente separati. Supponiamo che, nella situazione immaginata da Einstein nel 1927 si voglia misurare l'impulso di  $S_1$  *dopo* che particella e primo schermo hanno interagito. Allora, tramite il principio di conservazione dell'impulso, possiamo calcolare l'impulso della particella lontana *senza disturbarla in alcun modo*, dove quest'ultima frase in corsivo vale grazie al principio di località spaziotemporale: la particella è oramai lontana. Tuttavia, per il principio di Heisenberg, la particella (e lo schermo, per Bohr) dovrà allora avere una posizione *indefinita*. In

questo caso abbiamo impulso definito e posizione indefinita del sistema schermo-particella. Ma se, controfattualmente, dopo l'interazione con la particella avessimo invece deciso di misurare la *posizione* dello schermo, in base alla risposta di Bohr avremmo reso indefinito il suo impulso, e quindi, per le leggi della conservazione dell'impulso, avremmo reso indefinito anche l'impulso della particella lontana. In questa situazione alternativa e controfattuale, avremmo impulso indefinito e posizione definita. Benché le due variabili non siano naturalmente simultaneamente misurabili, si chiedono Einstein Podolsky e Rosen nel 1935: *come fa la realtà delle proprietà della particella lontana (la sua posizione e il suo impulso) a dipendere dal tipo di misura che decidiamo di effettuare sullo schermo, che può essere separato dalla particella da intervalli di spazio arbitrariamente grandi?* Una concezione della realtà fisica di questo tipo non è soddisfacente, pensava Einstein, e rimase convinto di questo tutta la vita.

Il dilemma di Einstein, come venne più chiaramente espresso in occasioni successive all'articolo del 1935 noto come EPR (1935), era il seguente: o la teoria quantistica ammette che la realtà arbitrariamente lontana della particella dipenda dal tipo di misura che decido di effettuare su  $S_1$ , violando con ciò il principio di *località* o di *separabilità* (per il quale due realtà spazialmente separate non possono dipendere in nessun modo l'una dall'altra), o la teoria è *incompleta*. Il secondo corno del dilemma, *per il quale Einstein optava ritenendo irrinunciabile la località*, dipende dal fatto che si può prevedere in ogni caso (sia se misuro il momento di  $S_1$  sia se ne misuro la posizione) con probabilità uguale a 1 quale sarà l'esito della misura sul momento o sulla posizione della particella lontana senza in alcun modo "disturbarla" misurandone direttamente le proprietà (stiamo assumendo la località spazio-temporale). Ne segue che alla particella lontana si deve attribuire una definitezza di proprietà che la teoria quantistica, proprio a causa del principio di indeterminazione di Heisenberg – che afferma che solo l'una o l'altra delle due osservabili sia posseduta con definitezza – non contempla. Il fatto di poter prevedere con certezza lo stato della particella lontana senza perturbarla implica per Einstein che esistano elementi di realtà che la meccanica quantistica nella sua struttura attuale non sa descrivere. Di qui l'accusa di

incompletezza. In una parola, il paradosso di EPR implica il dilemma tra non-località o incompletezza e, come sappiamo, recenti esperimenti hanno messo in luce in modo inequivocabile che il mondo quantistico, contrariamente alle aspettative di Einstein, è *non locale*.

L'aver spiegato in maggior dettaglio l'esperimento mentale proposto da Einstein nel 1927, con la sua naturale prosecuzione nell'argomento EPR del 1935, ci ha permesso di sottolineare con maggior forza il potere critico che esso ha avuto rispetto ai fondamenti della teoria quantistica. E in effetti, fu l'esperimento mentale di EPR del 1935 (con le sue anticipazioni precedenti) a spingere David Bohm ad una sua riformulazione nei primi anni Cinquanta, attraverso una proprietà tipica quantistica delle particelle chiamata spin. E furono EPR-Bohm a condurre, a loro volta, alla disuguaglianza scoperta da John Bell negli anni Sessanta, che permise infine un confronto tra ipotesi di località e riproducibilità delle correlazioni quantistiche con esperimenti reali. Insomma, gli esperimenti mentali proposti da Einstein (ma anche da Schrödinger con il suo famoso gatto) ebbero una potenza euristica straordinaria, visto che portarono non solo a innovazioni scientifiche dal profondo significato filosofico, ma anche a sviluppi tecnologici allora del tutto imprevedibili, dal teletrasporto alla crittografia quantistica, fino ai computer quantistici.

Si noti che, come era stato originariamente concepito da Einstein nel 1935, l'esperimento EPR era non solo tecnologicamente, ma anche fisicamente impossibile. Infatti non si può misurare in un'unica situazione sperimentale posizione e momento, come Einstein d'altra parte ben sapeva. Il punto per lui era che la realtà di una particella a distanza non poteva dipendere dal tipo di esperimento che si intendeva realizzare su un apparato sperimentale ( $S_1$ ) con il quale quella aveva già interagito. Bohr non colse a pieno la critica di Einstein, insistendo molto sull'irrealizzabilità fisica dell'esperimento EPR (Bohr 1935), ciò che però forse spinse Bohm a trovare una formulazione leggermente diversa del dilemma di Einstein, che permettesse in linea di principio di eseguire effettivamente l'esperimento. In una parola, *l'esperimento mentale di EPR si trasformò da fisicamente impossibile a tecnicamente possibile*, ciò che mostra al tempo stesso il potere

euristico degli esperimenti mentali e la loro capacità di scavare alla ricerca delle radici da cui si alimentano le teorie fisiche, per confermare ulteriormente la nostra fiducia in esse, o per scalzarle.

Dobbiamo ora porci l'interrogativo: in virtù di quale caratteristica gli esperimenti mentali adempiono a questa loro funzione di critica dei fondamenti? E, ritornando alla disputa sopra accennata, sono a priori, o derivano la loro forza da argomenti empirici? Sono argomenti di natura proposizionale o si appoggiano in modo essenziale ad aspetti iconici e non proposizionali?

### 3 L'epistemologia degli esperimenti mentali<sup>13</sup>

Il problema di stabilire con esattezza quale ruolo abbiano avuto nella scienza, ammesso che si possa parlare di un loro ruolo in generale, è allora essenzialmente *epistemologico*. Possiamo domandarci, con John Norton: “se gli esperimenti di pensiero hanno il compito di darci conoscenza del mondo naturale, da dove viene questa conoscenza?” (Norton 2002)

Qui discuteremo, in particolare, due diverse concezioni degli esperimenti mentali, una che li ritiene né più né meno che degli argomenti di natura empirica, dunque fallibili come tutti gli argomenti induttivi o deduttivi che siano, a seconda della verità empirica delle loro premesse e della validità dell'argomento (Norton 1991, 1996), e l'altra che affida agli esperimenti mentali risorse cognitive diverse dall'empirismo e basate sul razionalismo e sull'apriori, concedendo però spazio al fallibilismo (Brown 1991). Come era lecito attendersi, nessun contendente nell'arena della discussione ritiene insomma che gli esperimenti mentali siano guide epistemiche infallibili.

Cominciando dal problema della natura a priori o a posteriori degli esperimenti mentali, confessiamo di non capire molto la natura del dibattito, perché non comprendiamo la ragione per la quale la natura degli esperimenti mentali non potrebbe essere “mista”, in tre sensi diversi del termine “mista”.

---

<sup>13</sup> Per una buona rassegna sul ruolo degli esperimenti mentali in filosofia della scienza, rimando all'articolo in rete di Brown (2007), in <http://plato.stanford.edu/entries/thought-experiment/>

1) Da una parte l'esperimento mentale potrebbe all'inizio nascere in un contesto di pura analisi delle conseguenze di concetti (a priori), una riconcettualizzazione di ciò che già sappiamo, e poi trovare, come nel caso di EPR, conferme basate sull'esperienza, e dunque trasformarsi in un argomento vero e proprio fondato su premesse empiriche. Da questo punto di vista, la disputa tra Brown e Norton sarebbe in un certo senso mal posta, in quanto la tesi di Brown varrebbe per le fasi iniziali di proposizione di un esperimento mentale (contesto della scoperta dell'esperimento mentale) e quella di Norton per le fasi avanzate (il contesto della giustificazione, che coinvolge sempre premesse anche empiriche, anche quando l'esperimento mentale non si trasforma in un esperimento reale). Il contesto della giustificazione, come è usato qui, non coinvolge necessariamente un esperimento non-mentale, o reale, ma solo la ricostruzione dell'esperimento mentale in un formato più rigoroso, che tiene conto anche di leggi note. Nel caso dell'esperimento di Einstein del 1927 o in EPR, per esempio, è difficile negare che la legge di conservazione del momento o il principio di Heisenberg facciano parte delle premesse empiriche di quello che può essere ricostruito come un argomento (lasciando per ora da parte la questione sulla natura non-proposizionale degli esperimenti mentali)

2) Nel secondo senso di misto, potrebbe semplicemente darsi che *alcuni* esperimenti mentali siano o tendano maggiormente a essere considerati come una riconcettualizzazione a priori del già noto (quelli di Galilei per esempio sembrano appartenere al tipo "razionalistico"), mentre *altri* contengano in modo implicito ipotesi empiriche che si aggiungono a quelle note.

3) tale secondo senso di misto è giustificato dalla possibilità che le differenze tra a priori ed empirico non siano affatto così nette. Senza riesumare le critiche di Quine alla distinzione tra sintetico e analitico, c'è un ovvio senso in cui i concetti del senso comune, o le immagini mentali adoperate negli esperimenti mentali contengono molte ipotesi empiriche, e che queste ultime, d'altra parte, hanno componenti in parte derivate da convenzioni o da definizioni. Queste considerazioni tendono anch'esse a spostare l'attenzione del dibattito su questioni diverse dalla dicotomia troppo radicale apriori/empirico, già criticata dalla filosofia di Kant.

È forse più interessante esplorare il legame tra esperimenti mentali e immagini mentali (Nersessian 1993) e cercare di chiarire il senso in cui gli esperimenti mentali potrebbero non essere riproducibili in una struttura proposizionale (Gendler 2004). Questo dibattito ripercorre le discussioni nelle scienze cognitive tra pittorialisti e descrittivisti a proposito delle immagini mentali che ebbero luogo negli anni Ottanta. Dal modo in cui quel dibattito si è sostanzialmente concluso (esistono immagini mentali che hanno una codifica indipendente dalla struttura proposizionale/linguistico e alcuni problemi cognitivi vengono risolti manipolando immagini mentali)<sup>14</sup> sembrerebbe che potremmo accettare le critiche di Gendler a Norton come adeguate. Ovvero, sebbene possiamo riprodurre il contenuto di tutti o molti esperimenti mentali attraverso una struttura argomentativa/proposizionale, compiere esperimenti mentali non significa necessariamente trarre inferenze di natura argomentativa. Ma Norton può forse accettare il fatto che l'aspetto visivo giochi un ruolo molto importante nella presentazione di un esperimento mentale, senza con ciò abbandonare il punto di vista che in una ricostruzione rigorosa di un esperimento mentale l'aspetto linguistico/argomentativo sia centrale.

Questa breve rassegna sullo stato dell'arte intorno alla filosofia degli esperimenti mentali non ha risposto che in parte alla domanda che ci eravamo posti all'inizio: se un esperimento mentale è per definizione solo *immaginato*, da dove viene la sua forza evidenziale, ovvero che tipo di conoscenza offre?

Comincerei con il suggerire che parte della forza evidenziale, esplicativa ma anche innovativa degli esperimenti mentali viene indubbiamente dal loro carattere visivo, che si appoggia sull'intuibilità dei fenomeni nello spazio e nel tempo. Molti degli esperimenti mentali scientifici che abbiamo passato in rassegna hanno questo carattere "visuale": come è noto dagli studi di psicologia del pensiero creativo, le immagini mentali visive permettono di cogliere aspetti di un problema legati per esempio ad elementi di simmetria spaziale, che il pensiero proposizionale può descrivere

---

<sup>14</sup> Ci ricorda Gendler che «Roger Shepard and others has shown that judgments about topological similarity are generally made after engaging in the mental manipulation of an image: the greater the degree of rotation required to project one onto the other, the longer it takes to judge whether two figures are isomorphic.» (Gendler 2004, p.1159).

con molta più fatica e solo *post factum*, ovvero solo dopo aver visualizzato l'aspetto problematico in questione. Direi dunque che *se* gli esperimenti mentali forniscono *credenze vere* su aspetti contingenti del mondo, nella misura in cui si appoggiano a rappresentazioni visive, la loro giustificazione ha a che fare con caratteristiche intuitive, dove "intuitive" significa qui "riguardanti lo svolgersi di un certo fenomeno che è immaginato nello spazio e nel tempo mentale". Contro Brown, tuttavia, questo aspetto intuitivo non è necessariamente da concepirsi come una sorta di telescopio puntato nel regno astratto di leggi platoniche che necessitano le regolarità empiriche (Brown 2004, p. 1131). E contro Norton, tale aspetto intuitivo non deve essere necessariamente concepito come un mero "un rivestimento pittoriale" ("picturesque clothing") che aggiunge forza puramente retorica all'esperimento mentale (Norton 2004, p.1139). Ma anche in questo caso, possiamo concludere con un atteggiamento irenico, come abbiamo fatto sopra a riguardo dell'opposizione a priori/empirico che divide Brown da Norton: non tutti gli esperimenti mentali hanno questo carattere intuitivo o quasi-rappresentativo, nello stesso senso in cui non tutte le persone hanno la stessa abbondanza di immagini mentali nei loro processi di pensiero. Così come non ha senso ritenere che tutti gli esseri umani pensino o solo a parole o solo attraverso immagini, non c'è ragione di sostenere che *tutti* gli esperimenti mentali abbiano un carattere di modello mentale. Rimane allora da affrontare la seguente domanda: da dove traggono la loro forza evidenziale gli esperimenti mentali che non si appoggiano in modo particolare a immagini mentali?

La risposta va cercata nella consapevolezza che non tutti i mutamenti scientifici sono dovuti all'aggiungersi di nuovi dati osservativi. Come hanno insistito soprattutto Koyré e Kuhn, *il vedere lo stesso materiale osservativo in modo diverso* – si pensi alle immagini della psicologia della Gestalt su cui Kuhn ha spesso fatto leva – è stato spesso il motore di una rivoluzione scientifica. Ciò implica che il mutamento rivoluzionario è avvenuto soprattutto dal lato dei concetti utilizzati per organizzare il materiale empirico, un mutamento, se si vuole, che è dunque di natura più filosofica che osservativa. Quando Einstein nel 1905 ristrutturò il nostro concetto di tempo e quindi di spazio, non aggiunge dati empirici nuovi al campo dell'elettrodinamica dei corpi in movimento:

piuttosto si chiede, al modo di Agostino, che cos'è il tempo?, e mostra come il concetto di simultaneità entri in modo necessario nell'attribuzione agli eventi di un'etichetta temporale. Esperimenti mentali come quello del treno in movimento, proposto dopo la formulazione della teoria nel saggio divulgativo sulla relatività, o come quello che consiste nell'immaginare di cavalcare un raggio di luce, proposto prima, diventano allora modi per ristrutturare la nostra conoscenza del mondo fisico, modi per guardare allo *stesso* materiale empirico da punti di vista o prospettive diverse, modi per porre sotto esame la coerenza dei nostri concetti fondamentali. In questo senso, e con i *caveat* di cui sopra, la tesi di Brown sulla natura a priori degli esperimenti mentali sembra fondamentalmente corretta.

In una parola dunque, difendere un ruolo per gli esperimenti mentali nella storia della fisica significa difendere al tempo stesso un ruolo per la filosofia nel mutamento scientifico rivoluzionario e quindi nella scienza *tout court*, e rafforzare la convinzione einsteiniana che la scienza stia alla filosofia come le intuizioni kantiane stanno alle categorie della Ragion Pura: la scienza senza la filosofia è vuota, ma la filosofia senza la scienza è cieca.<sup>15</sup>

## Bibliografia

- Arthur R. (1999), On Thought Experiments as A Priori Science, *International Studies in the Philosophy of Science*, **13**, 3, 215-229.
- Bohr N. (1935), Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?, *Phys. Rev.* **48**, pp. 696 – 702.
- Brown J. (1991), *Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*. London: Routledge.
- \_\_\_\_\_ (2004), “Peeking into Plato’s Heaven”, *Philosophy of Science*, **71** (December 2004) pp. 1126-1138.
- \_\_\_\_\_ (2007), <http://plato.stanford.edu/entries/thought-experiment/>
- Dorato M. (2000), *Il software dell’universo*, Bruno Mondadori, Milano.
- Dorato M. (2007), *Cosa c’entra la filosofia con la scienza? Un’introduzione alla filosofia della scienza*. Laterza, Roma-Bari.
- Einstein, A., Podolsky B., Rosen N. (1935), "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", *Physical Review*, **47**:777-780.
- Einstein A. (1949), „Autobiographisches” in *Albert Einstein Philosopher Scientist*, a cura di P.A. Schilpp, Tudor, Evanston, trad. it in *Opere scelte*, a cura di Enrico Bellone, Bollati Boringhieri, Torino, 1988, pp. 61-109.

---

<sup>15</sup> Per una difesa articolata di questa tesi, rimandiamo a Dorato (2007).

- Galilei G. (1638), *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno a due nuove scienze*, Leyden: Elzevir, in *Opere* a cura di A. Favaro, Vol VIII, Firenze, 1890-1910.
- Gendler, T.S. (2004), "Thought Experiments Rethought—and Reperceived", *Philosophy of Science*, 71 (December 2004), pp. 1152–1163.
- Ghirardi G. (1996), *Un'occhiata alle carte di Dio*, Il Saggiatore, Milano.
- Kuhn, T. S. (1964), "A Function for Thought Experiments", in *The Essential Tension*, 1977, originariamente pubblicato in *L'aventure de la science, Melanges Alexandre Koyré*, Paris Herman, 1964, trad. it. di M.Vadacchino, "Una funzione per gli esperimenti mentali", in *La tensione essenziale*, Einaudi, Torino, 2006, pp.97-127.
- Laudisa F. (1998), *Correlazioni pericolose*, Il Poligrafo, Padova.
- McAllister, J. (1996), "The Evidential Significance of Thought Experiments in Science", *Studies in History and Philosophy of Science* 27(2): 233–250.
- (2004), "Thought Experiments and the Belief in Phenomena" *Philosophy of Science* 71 (Proceedings): 1164–1175.
- Maxwell J.C. (1871), *Theory of Heat*, in Leff, H.S. & Rex, A.F. (eds) (1990). *Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing*. Bristol: Adam-Hilger.
- Nersessian, N., 1993, "In the Theoretician's Laboratory: Thought Experimenting as Mental Modeling" in D. Hull, M. Forbes, and K. Okruhlik (eds.) *PSA 1992*, vol. 2, East Lansing, MI: Philosophy of Science Association, pp. 291-301
- Norton J. (2004a), "On Thought Experiments: Is There More to the Argument?" *Philosophy of Science*, 71 (December 2004) pp. 1139–1151.
- Norton J. (2004b), "Einstein's Investigations of Galilean Covariant Electrodynamics prior to 1905," *Archive for History of Exact Sciences*, **59**, pp. 45-105.