

Concetti comparativi, concetti quantitativi e problema della misurazione

di

DAVIDE PIETRINI - GINO TAROZZI

ABSTRACT: *Comparative Concepts, Quantitative Concepts and the Problem of Measurement.* According to the classic conception of scientific revolution by Thomas Kuhn, the progress of science is marked by epistemological breaks and the establishment of new scientific paradigms. According to this perspective, the birth of Galilean and Newtonian science would be characterized by a substantial discontinuity with respect to ancient science due to a direct transition from a qualitative to a quantitative description of phenomena. Other authors, such as P. Duhem and W. Shea, have argued on the other hand in favor of a greater continuity in the development of scientific theories. To understand the historical transformation of the cognitive content of scientific concepts, it may be fruitful to refer to the perspective outlined by R. Carnap to study the logical evolution of concepts in his *Philosophical Foundations of Physics*, in which he stressed the essential function of comparative concepts in the transition from qualitative to quantitative concepts of science. Considering and discussing the problem of measurement in classical and quantum physics, we will try to show the importance of comparative concepts for the formation of quantitative concepts and their impact in the development of measurement procedures by extending Carnap's analysis from the logical to the historical context.

KEYWORDS: Carnap, Scientific Revolution, Comparative Concepts, Measurement Procedures, Problem of Measurement, Yes-No Experiments

ABSTRACT: Secondo la classica concezione kuhniana di rivoluzione scientifica il progresso della scienza è contrassegnato da rotture epistemologiche e dall'instaurazione di nuovi paradigmi scientifici. In base a tale prospettiva la nascita della scienza galileiana e newtoniana sarebbe caratterizzata da una sostanziale discontinuità rispetto alla scienza antica dovuta a un diretto passaggio da una descrizione qualitativa a una descrizione quantitativa dei fenomeni. Altri autori, come P. Duhem e W. Shea, hanno invece argomentato a favore di una maggiore continuità nello sviluppo delle teorie scientifiche. Per comprendere la trasformazione storica del contenuto cognitivo dei concetti scientifici può essere proficuo far riferimento alla prospettiva delineata da R. Carnap per studiare l'evoluzione logica dei concetti nel suo *Philosophical Foundations of Physics*, in cui egli ha sottolineato

Contributo sottoposto a *double blind peer-review*. Ricevuto: 15.12.2024; accettato: 24.04.2024.

© Gli Autori 2024. Pubblicato da Syzetesis - Associazione filosofica. Questo è un articolo Open Access, distribuito ai sensi della licenza CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), che ne consente la riproduzione e distribuzione non commerciale, a condizione che l'opera originale non sia alterata o trasformata in alcun modo e che sia opportunamente citata. Per utilizzi commerciali contattare associazione@syzetesis.it.

la funzione imprescindibile dei concetti comparativi nella transizione dai concetti qualitativi a quelli quantitativi della scienza. Prendendo in considerazione e discutendo il problema della misurazione in fisica classica e quantistica, cercheremo di mostrare l'importanza dei concetti comparativi nella formazione dei concetti quantitativi e del loro impatto nella elaborazione di procedure di misurazione estendendo l'analisi carnapiana dal contesto logico e quello storico.

KEYWORDS: Carnap, Rivoluzione scientifica, Concetti comparativi, Procedure di misurazione, Problema della misurazione, Yes-No Experiments

1. *Presentazione del problema*

Secondo Kuhn il progresso scientifico è contrassegnato da cambi di paradigma che sono al tempo stesso processi «distruttivi e costruttivi». Ne *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* Kuhn dedica un intero capitolo alla nozione di anomalia, quale fattore che dà avvio alla scoperta e che è alla base di rotture epistemologiche e dell'instaurazione di nuovi paradigmi scientifici. L'anomalia emerge quando si ha la presa di coscienza del fatto che la natura ha violato le aspettative suscitate dal paradigma dominante¹. Il processo di transizione tra paradigmi è al centro anche del famoso saggio di Koyré *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, in cui viene sottolineato il ruolo fondamentale giocato dalla matematica nella rivoluzione scientifica. Seguendo Koyré, fino al Rinascimento l'uomo non calcola (in senso algebrico e aritmetico), ma si limita a misurare attraverso procedure di confronto. La stessa alchimia produce ricette imprecise e qualitative, non usa strumenti di calcolo ma di comparazione, come le proporzioni e la bilancia. Lo stesso avviene in ambito militare: ad esempio la competenza e l'esperienza nel posizionare i cannoni dell'architetto militare sono più apprezzate del ricorso alla squadra e al quadrante. È dal XVII secolo che assistiamo ai primi indizi di questo passaggio epocale, che viene generalmente considerato come il passaggio da un'interpretazione qualitativa a una descrizione quantitativa del mondo. Al centro di questo passaggio sta l'impiego sempre più massiccio di geometria e matematica per comprendere la realtà fisica e per costruire gli strumenti attraverso i quali è possibile attribuire dei valori numerici alle grandezze fisiche. Come

¹ T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago 1996.

ricorda Koyré, gli artigiani fabbricavano secondo le regole del mestiere e non con l'idea di fabbricare uno strumento scientifico. Spesso era il matematico che commissionava la costruzione dello strumento fornendo loro il progetto: gli artigiani possedevano notevoli abilità sul piano della tecnica, ma scarsa competenza scientifica². Per far fronte a questo problema a Urbino, centro rinascimentale molto rinomato anche per le sue officine di strumenti, sorse nel Seicento una prestigiosa accademia per la formazione teorica e pratica di apprendisti artigiani, nel quale l'insegnamento delle matematiche aveva una funzione imprescindibile³. Teoria e tecnica ebbero congiuntamente un ruolo centrale nel progresso della scienza. Da quando si affermò l'idea di impiegare strumenti per fare ricerca scientifica, emerse ben presto l'esigenza di costruirli in maniera sempre più precisa. Con il perfezionamento dello strumento adibito alla misurazione e al calcolo, in particolare del tempo, si compirà il passaggio dal mondo pressappoco all'universo della precisione.

Mentre il punto di vista storico di Koyré è caratterizzato da un passaggio diretto e discontinuo dal pressappoco alla precisione, e che fa da sfondo all'analisi kuhniiana di rivoluzione scientifica, Carnap, uno dei massimi esponenti del positivismo logico, ha proposto un'analisi dell'origine dal punto di vista logico dei concetti scientifici quantitativi che appare invece caratterizzata da una sostanziale continuità⁴. Nel suo *Philosophical Foundations of Physics: An Introduction to the Philosophy of Science* ha sostenuto infatti che dal punto di vista della genesi formale il passaggio dal qualitativo al quantitativo non avviene in modo diretto con un passaggio o un salto, ma piuttosto nei termini di una transizione continua nella quale dai concetti qualitativi di tipo classificatorio si giunge a quelli metrici solo passando attraverso una classe di concetti, la cui importanza sarebbe stata secondo Carnap quasi sempre ingiustificatamente sottovalutata della scienza: i cosiddetti concetti comparativi⁵.

² A. Koyré, *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, a cura di P. Zambelli, Einaudi, Torino 2000.

³ S. A. Bedini, *La dinastia Barocci. Artigiani della scienza in Urbino 1550-1650*, in F. Vetrano (ed.), *La scienza del ducato di Urbino/The Science of the Dukedom of Urbino*, Accademia Raffaello, Urbino 2001.

⁴ Cfr. P. Duhem, *Les origines de la statique*, Hermann, Paris 1905 (P. Duhem, *The Origins of Statics. The Sources of Physical Theory*, trad. di G. F. Leneaux-V. N. Vagliente-G. H. Wagoner, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1991), e W. R. Shea, *Galileo's Intellectual Revolution*, MacMillan, London 1972.

⁵ R. Carnap, *Philosophical Foundations of Physics: An Introduction to the Philosophy of Science*, Basic Books, Inc. Publishers, New York-London 1966.

Come mostreremo nel seguito, le considerazioni che seguono potrebbero essere applicate non solo alla scienza, ma anche alla storia della scienza, portando in tal modo un significativo argomento a favore di una interpretazione più continuista e meno basata su radicali rotture epistemologiche dell'evoluzione della scienza e delle stesse rivoluzioni scientifiche.

Nel suo saggio Carnap distingue tre classi di concetti della scienza: egli individua non solo i classici concetti classificatori e quantitativi, ma anche una terza classe di concetti comparativi. Il concetto classificatorio indica semplicemente un concetto che pone un oggetto in una certa classe e lo circoscrive da un punto di vista qualitativo. I concetti comparativi sono invece quelli che stabiliscono una relazione non ancora esprimibile in termini quantitativi, come accade invece nel caso delle principali leggi scientifiche, di un dato concetto rispetto a due diversi oggetti, ad esempio meno pesante o più pesante. I concetti comparativi sussistono quindi solo se abbiamo due o più oggetti che possono essere messi in relazione tra loro. Infatti, mentre un concetto classificatorio, come «warm» o «cool» colloca semplicemente un oggetto all'interno di una classe, un concetto comparativo come «warmer» o «cooler» ci dice come un oggetto è correlato, in termini di più o meno, a un altro oggetto. I concetti quantitativi sono invece, come è ben noto, quei concetti che possono essere misurati e i cui valori possono essere espressi da numeri. La differenza fra qualitativo e quantitativo non è una differenza nella natura del concetto, bensì una «differenza nel nostro sistema concettuale»⁶. Per meglio comprendere il significato di questa classificazione possiamo prendere come esempio i metodi di misurazione dell'intensità e della magnitudo dei terremoti. In sismologia persistono ancora oggi due metodi di misurazione riconducibili a un metodo di tipo qualitativo e a un metodo di tipo quantitativo, ma che sono tra loro complementari. La scala Mercalli, che si basa sull'osservazione soggettiva dei danni che il terremoto produce, usa un sistema qualitativo ed è impiegata per misurare l'intensità. La scala Richter, invece, impiega un metodo di tipo quantitativo, perché associa un valore alla magnitudo di un terremoto.

Nella genesi dei concetti scientifici, come è stato rilevato da Carnap, «accade spesso che un concetto comparativo diventi successivamente la base per uno quantitativo». Tali concetti verrebbero quindi a giocare

⁶ R. Carnap, *op. cit.*, pp. 51-61.

un «ruolo intermedio» tra i concetti classificatori qualitativi, come ad esempio caldo e freddo, e i concetti quantitativi misurabili delle scienze matematizzate della natura, come il concetto metrico misurabile di temperatura. Per questo motivo noi non dovremmo, secondo Carnap, sottostimare l'utilità dei concetti comparativi, specialmente nei campi in cui il metodo scientifico e i concetti quantitativi non sono stati ancora pienamente sviluppati.

Per poter distinguere i concetti comparativi da quelli quantitativi è necessario stabilire alcuni criteri «empirici». Ora vediamo come Carnap individua i criteri nel caso dei concetti comparativi. A tale scopo egli prende come esempio il concetto di peso. La procedura mediante la quale riusciamo a stabilire i criteri è una procedura empirica e si basa sull'impiego di una bilancia a bracci uguali (*balance scale*) e di due regole definite empiricamente: le relazioni E e M , dove E indica la relazione di uguaglianza e M indica la relazione «minore di». La relazione E , essendo «transitiva», simmetrica e «riflessiva», è nella logica delle relazioni anche una relazione di «equivalenza». Secondo Carnap, ci sono quattro condizioni che le relazioni E e M devono soddisfare:

1. E deve essere una relazione di equivalenza.
2. E e M devono escludersi a vicenda.
3. M deve essere transitiva.
4. Per ogni coppia di oggetti a e b deve valere uno dei tre casi seguenti:
 - a. E vale fra i due oggetti.
 - b. M vale fra a e b .
 - c. M vale fra b e a .

È importante notare che, secondo Carnap, una coppia di concetti comparativi corrisponde a un concetto quantitativo.

Passiamo ora dai concetti comparativi a quelli quantitativi. Il primo passo, secondo Carnap, per definire i concetti quantitativi è quello di delineare le regole del processo di misurazione. Per un concetto quantitativo, che Carnap chiama grandezza G , la regola 1 stabilisce che, se fra due oggetti a e b vale la relazione empirica di equivalenza Eg , allora i due oggetti hanno uguali valori della grandezza G . La regola 2 stabilisce la relazione empirica «essere minore» Mg , cioè che, se fra a e b vale la relazione Mg , il valore della grandezza G sarà minore sia per a che per b . Le regole 3 e 4 assegnano valori numerici

alla grandezza che vogliamo misurare. La regola 5 stabilisce la determinazione dell'esatta forma della scala⁷.

A differenza delle «grandezze intensive», come ad esempio la temperatura, per la cui misurazione sono richieste le 5 regole appena viste, nel caso dei concetti chiamati «grandezze estensive», come il peso, possiamo impiegare una procedura di misurazione basata su uno schema più semplice. Per misurare il peso sono sufficienti tre regole: la seconda regola, che Carnap riporta prima delle altre, è il principio di addizione, cioè $3 + 3$. La prima regola è quella dell'uguaglianza, essa coincide con la prima regola dello schema a cinque regole, cioè $3 + 3$ equilibra 6. La terza regola specifica l'unità di misurazione della grandezza, cioè il kg, introdotto nel sistema metrico francese il 1° agosto 1793⁸.

Nell'ambito di un'interpretazione logica della scienza, assumono particolare importanza le relazioni di simmetria, transizione e riflessione; queste ultime hanno la loro estensione geometrica nei concetti euclidei di rapporto e proporzione. All'interno della scienza delle proporzioni geometriche, le grandezze vengono prima confrontate le une con le altre, poi sono misurate attribuendo loro un numero. Tale scienza svolge una funzione di ponte, portando alla sostituzione dei concetti qualitativi classificatori della scienza aristotelica con i concetti comparativi, presentandosi come passaggio ineludibile verso i concetti quantitativi misurabili, le cartesiane qualità primarie, della scienza moderna⁹. Dal momento che noi non possiamo conoscere la grandezza fino a quanto questa non sarà misurata, cioè fino a quando non avremo le regole per misurarla, il concetto quantitativo non precede la misurazione, ma nasce effettivamente dal processo di misurazione. Pertanto, possiamo affermare che i concetti quantitativi sono necessariamente correlati alla nozione di misurazione.

Uno dei lavori più importanti riguardanti la nozione di misurazione è la voce *Measurement in Science* di Eran Tal nella *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, in cui è passata in rassegna la letteratura principale sul tema. In particolare, viene individuato un interessante

⁷ Ivi, pp. 62-69.

⁸ Ivi, pp. 70-77.

⁹ D. Pietrini-G. Tarozzi, *Esperienza e matematica in Leonardo*, in F. Maracci-S. Tagliagambara (eds.), *Atti del Convegno Leonardo e la Luna. Alle origini della scienza moderna. Cinquecentenario di Leonardo e cinquantennio dell'allunaggio*. Pontificia Università Lateranense, Roma, 20 novembre 2019, numero speciale, «Giornale di Astronomia» 46/4 (2020), pp. 47-53.

sviluppo dei concetti di quantità e di grandezza nella distinzione che fa Kant nella *Critica della ragion pura* tra quantità estensive e quantità intensive. Secondo Kant, che basa probabilmente tale distinzione sul principio di continuità di Leibniz, le quantità estensive sono quelle quantità nelle quali la rappresentazione delle parti permette la rappresentazione del tutto, come nel caso delle lunghezze. Invece, le quantità intensive sono quelle caratterizzate da gradi continui e rappresentabili mediante approssimazione per negazione, come ad esempio il calore e i colori¹⁰.

Nei prossimi paragrafi esaminiamo l'importanza dei concetti comparativi nella storia della scienza. In particolare si cerca di mostrare il valore dei concetti comparativi per la formazione dei concetti quantitativi e il loro impatto nella elaborazione di una teoria formale della misurazione¹¹. Vedremo che nella fisica classica il processo di misurazione è descritto come un mero processo di registrazione che ha come massime aspettative sia l'aumento della precisione, sia l'ampliamento della sensibilità in modo tale da poter investigare domini empirici precedentemente inaccessibili. La situazione muta radicalmente con la scoperta di Planck del suo *postulato quantistico* fondamentale, da cui deriva l'importante conseguenza che ogni processo di misurazione è in realtà un'interazione e quindi comporta una perturbazione inevitabile da parte dell'apparecchio di misurazione sul sistema fisico misurato. Solo in questo contesto si manifesta l'esigenza di una teoria che descriva il processo di misurazione come un qualsiasi altro processo interazione fisica tra due oggetti descrivibili attraverso un'unica teoria fondamentale quale si presenta appunto la meccanica quantistica. Tuttavia, ciò che emerge è in realtà la problematicità di formulare una teoria quantistica soddisfacente della

¹⁰ E. Tal, *Measurement in Science*, in E. N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2020 Edition), <https://plato.stanford.edu/archives/fall2020/entries/measurement-science/> (ultimo accesso 09.06.2024).

¹¹ Sui fondamenti della misurazione rimangono imprescindibili i lavori di von Helmholtz (E. von Helmholtz, *Contare e misurare considerati dal punto di vista della teoria del conoscere*, in *Opere di Hermann von Helmholtz*, V. Cappelletti (ed.), UTET, Torino 1887, pp. 699-746) e di Krantz, Luce, Suppes e Tversky (D. H. Krantz-R. D. Luce-P. Suppes-A. Tversky, *Foundations of Measurement*, 3 voll., Academic Press, New York-London 1971). Benché la vasta letteratura sul tema sia sullo sfondo, il nostro saggio non si configura come uno studio filosofico del concetto di misurazione, ma affronta il problema della misurazione secondo un approccio storico e fondazionale, concentrandosi sul rapporto tra strumento, osservatore e oggetto misurato e sull'importanza dei concetti comparativi nella storia della scienza.

misurazione. Di fronte a simili difficoltà sono state proposte diverse soluzioni, tra le quali una riduzione delle operazioni di misurazione a procedure di tipo comparativo.

2. Teoria delle proporzioni e concetti comparativi nella storia della scienza

A livello storico, i concetti comparativi fanno il loro ingresso molto presto nella scienza. Si consideri che l'attività del comparare era già impiegata in tempi antichi, soprattutto dai mercanti mediante lo strumento della bilancia. Le prime bilance per confrontare i pesi delle merci e le prime stadere erano costruite senza avere una chiara idea del principio della leva, che avrà una prima formulazione rigorosa con Archimede, ma solo sulla base del loro comportamento appreso dalle attività quotidiane. Nel Rinascimento l'attività del comparare, che operativamente prende le mosse da procedure già consolidate, trova la sua giustificazione teorica sulla base soprattutto di due concetti ben precisi: sui rapporti di simmetria che si devono instaurare tra pesi e distanze dal fulcro e sulla cosiddetta teoria delle proporzioni numeriche e geometriche ($P_1 : P_2 = D_2 : D_1$). La teoria delle proporzioni basava la sua esplicazione numerica nel libro quinto degli *Elementi* di Euclide. Nell'ambito della teoria delle proporzioni i rapporti ammessi erano solo rapporti numerici interi o solo rapporti tra grandezze omogenee¹². Per grandezze omogenee si intendono quelle grandezze che appartengono alla stessa classe, nel senso che esse possono essere sommate, sottratte e confrontabili. Questo vuol dire che la relazione poteva essere posta solo tra peso (P_1) e peso (P_2) e tra distanza (D_2) e distanza (D_1), e non tra peso e distanza ($P_1 \cdot D_1 = D_2 \cdot P_2$)¹³.

Queste riflessioni permisero anche di comprendere meglio il concetto di rapporto di simmetria. Se due gravi sono posti alla stessa distanza dal fulcro e la bilancia è in equilibrio, allora i gravi sono interscambiabili tra loro e quindi esiste una relazione di simmetria. Allo stesso modo era chiaro, ma di non facile spiegazione, che qualcosa di simile doveva avvenire anche nel caso di una bilancia in equilibrio con gravi di diverso peso posti a distanze diverse dal fulcro. La difficoltà nel giustificare da un punto di vista teorico questa equivalenza "empirica" era principalmente dovuta al fatto che ancora non si era in grado di

¹² E. Giusti, *Euclides reformatus. La teoria delle proporzioni nella scuola galileiana*, Bollati Boringhieri, Torino 1993.

¹³ Sulla nozione di grandezza omogenea si veda E. von Helmholtz, *op. cit.*

trasformare un'uguaglianza di rapporti tra grandezze omogenee in un'uguaglianza di prodotti tra grandezze non omogenee.

L'idea di proporzionalità non perteneva solo all'ambito geometrico e non era riconducibile solo al principio della leva. Nel Rinascimento possiamo assistere a importanti riflessioni sul concetto di proporzionalità anche in ambito architettonico o nella progettazione di macchine¹⁴. Nel Seicento la proporzione sarebbe diventata il linguaggio ottimale per l'ideazione di una nuova filosofia della natura e vedrà in Galileo uno dei maggiori interpreti.

Gradualmente la teoria delle proporzioni si evolve mostrando connotati quantitativi. La maggiore conquista data da questo passaggio è traducibile con la seguente equivalenza $P_1 : P_2 = D_2 : D_1 \sim P_1 \cdot D_1 = P_2 \cdot D_2$ già adombrata dall'urbinate Bernardino Baldi nel suo commento alle *Questioni Meccaniche* di pseudo-Aristotele. Secondo l'urbinate la causa dell'equilibrio di una leva è data dal rapporto permutato tra bracci e pesi, quest'ultimo riconducibile all'uguaglianza di stato tra le due parti equiponderanti. Nel corso della sua dimostrazione, Baldi propone di considerare bracci e pesi equipollenti, intuendo l'equivalenza, tutta moderna, tra la proporzionalità inversa tra pesi e distanze dal fulcro ($P_1 : P_2 = D_2 : D_1$) e l'uguaglianza dei prodotti tra pesi e rispettive distanze dal fulcro ($P_1 \cdot D_1 = P_2 \cdot D_2$). Secondo l'urbinate i bracci operano non in quanto pesi, ma in quanto forze. Questa precisazione di Baldi racchiude l'idea che le condizioni di equilibrio di una leva non dipendono solo dai pesi ma dall'effetto (o dalla forza) che essi acquistano in rapporto alla loro posizione sulla leva. Baldi intuisce in maniera profondamente innovativa che, se consideriamo i bracci come potenze o forze (*potentiae* o *vires*), è possibile porre in relazione diretta i pesi e con le rispettive distanze dal fulcro. In questa digressione si assiste a un primitivo passaggio concettuale da gravità posizionale a *momento*, ponendo l'uguaglianza di stato come causa dell'equilibrio. Secondo questa lettura diventa dunque chiaro il motivo per cui una relazione tra pesi diversi e distanze diverse può avere connotati simmetrici, cioè perché l'uguaglianza non riguarda le singole grandezze ma i prodotti tra pesi e distanze. La stessa interpretazione affiora anche dal lungo commento dell'architetto francese C. Perrault al vocabolo *proportion*, contenuto all'interno della sua edizio-

¹⁴ D. Pietrini, *Il Mechanicorum Liber di Guidobaldo del Monte: "esperienze", geometria e rappresentazioni di macchine*, «Physis. Rivista internazionale di Storia della Scienza» 58/1 (2023), pp. 85-112.

ne del *De architectura* di Vitruvio (1673). Perrault afferma che accanto alla «simmetria degli antichi», fondata essenzialmente sul concetto di proporzione, all'inizio dell'età moderna si delinea una seconda nozione di simmetria, non più legata alla proporzione ma fondata su un «rapporto d'uguaglianza tra parti contrapposte»¹⁵.

Da un'interpretazione dei rapporti tra grandezze, facente capo alla tradizione pitagorica, secondo la quale le relazioni possono essere espresse solo tra grandezze commensurabili, si passa a nuova concezione di rapporto di uguaglianza che accetta anche rapporti tra grandezze non commensurabili e non omogenee.

L'interpretazione quantitativa del comportamento della leva trova il suo compimento con la definizione matematica del concetto di forza da parte di Newton e con l'affermazione della nozione di momento meccanico (momento $[M] = \text{braccio } [m] \cdot \text{forza } [N]$)¹⁶. L'esplicazione galileiana del concetto di momento aprirà la strada alla definizione di simmetria in termini di nozione di invarianza e di trasformazione. Con l'applicazione dell'algebra alla geometria di Descartes, che darà successivamente origine alla meccanica analitica, si giungerà infine all'elaborazione formale della meccanica e all'analisi quantitativa del concetto di peso. Uno dei protagonisti di questo importante cambio di prospettiva fu J. L. Lagrange, il quale cercò di compendiare le leggi meccaniche in una sola formula, descrivendo nella sua celebre equazione l'evoluzione temporale di una grandezza scalare come l'energia, rinunciando a tal modo alla necessità della visualizzazione¹⁷.

3. La misurazione come processo di registrazione nella fisica classica

Nei precedenti paragrafi abbiamo presentato la connessione logica

¹⁵ Cfr. G. Hon-B. R. Goldstein, *From Proportion to Balance: The Background to Symmetry in Science*, «Studies in History and Philosophy of Science» 36 (2005), pp. 1–21.

¹⁶ Sulla formulazione della Legge della Leva e sulla sua relazione con le nozioni qualitative e quantitative si veda anche l'esempio di Schlaudt (O. Schlaudt, *Hölder, Mach, and the Law of the Lever: A Case of Well-founded Non-controversy*, «Philosophia Scientiæ» 17/1 (2013), pp. 93–116) utilizzato per spiegare la distinzione tra operazioni intellettuali e fisiche contenuta all'interno dello studio di O. Hölder *Die mathematische Methode. Logisch erkenntnistheoretische Untersuchung im Gebiete der Mathematik, Mechanik und Physik* (1924).

¹⁷ E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, trad. it. di A. D'Elia, Bollati Boringhieri, Torino 1992, pp. 457–470.

tra concetti comparativi e quantitativi evidenziata da Carnap, ponendo particolare enfasi sull'importanza dello strumento di misurazione. Inoltre, abbiamo introdotto alcuni esempi di impiego della teoria delle proporzioni nell'ambito di una fisica di tipo comparativo. In questo paragrafo esaminiamo il rapporto tra strumento di misura, sistema fisico misurato e inefficacia di una teoria della misurazione in fisica classica.

È noto che lo strumento ha svolto un ruolo centrale nella fase di fondazione della scienza moderna. In particolare ha permesso di ampliare il dominio dell'esperienza sensibile e di individuare nuovi fenomeni naturali. Nonostante la sua importanza euristica, lo strumento finisce ben presto relegato in una funzione di subordinazione rispetto al contesto teorico nel quale viene utilizzato, assumendo una posizione di estraneità nei confronti della struttura formale della teoria. Questo perché in un contesto logico della meccanica classica lo strumento consente solo di estrarre informazioni sullo stato di un sistema fisico. In fisica classica la teoria della misurazione è riconducibile ai soli procedimenti di misurazione, i quali mirano a registrare i dati attribuendo valori numerici a proprietà osservabili in rapporto alla loro evoluzione temporale. Ad esempio nel caso degli studi effettuati da Galileo sulla forma geometrica del moto dei proiettili, e che sarebbero stati alla base dell'elaborazione di una teoria deduttiva del moto, la procedura misurativa consisteva nell'osservare la traccia lasciata da una pallina tinta d'inchiostro «sopra uno specchio di metallo, tenuto non eretto all'orizzonte, ma alquanto inchinato» e nella registrazione dei dati ottenuti¹⁸. Anche nel caso dell'osservazione al telescopio della posizione di un pianeta o della determinazione della massa di un corpo attraverso la bilancia, la misurazione è registrazione dei dati. In fisica classica lo strumento non interferisce significativamente sul sistema osservato e quindi non ha un carattere perturbativo, come invece sarebbe accaduto nel caso della fisica quantistica. La conseguenza è che in fisica classica non si richiedeva la necessità di elaborare una teoria della misurazione. Infatti, i trattati di fisica sperimentale del XVIII e XIX secolo si basano prevalentemente sull'illustrazione e sulla spiegazione delle modalità di funzionamento degli strumenti di osservazione e misura, considerando

¹⁸ J. Renn-P. Damerow-S. Rieger-D. Giulini, *Hunting the White Elephant: When and How did Galileo Discover the Law of Fall?*, in J. Renn (ed.), *Galileo in Context*, Cambridge University Press, Cambridge 2001, pp. 29-149.

superflua la descrizione teorica del processo di interazione.

Sebbene in fisica classica la misurazione sia solo registrazione del dato e non crei fenomeni perturbativi, si possono trovare casi in cui lo strumento potrebbe in linea teorica perturbare il sistema misurato. Questo è il caso della misurazione della temperatura. Infatti, se volessimo misurare la temperatura di un organismo piccolo a piacere, ecco che il nostro strumento di misurazione andrebbe a riscaldare o a raffreddare l'organismo sottoposto alla misurazione. In questo caso però l'alterazione della temperatura prodotta dallo strumento sarebbe facilmente definibile mediante l'analisi di variabili controllabili.

Dato che le procedure di misurazione caratterizzanti le pratiche scientifiche fino all'Ottocento possono essere ricondotte ad attività di registrazione dei dati, ne consegue che produrre una teoria della misurazione non era necessario. Infatti, l'idea dell'esistenza di uno strumento "ideale", in grado di stabilire con assoluta precisione lo stato del sistema fisico misurato, che trova la sua espressione più significativa nel demone di Laplace, non era soltanto un fatto contingente consentito dalle "grandi" dimensioni dei corpi macroscopici, ma appare anche una necessità logica del formalismo della meccanica classica, che può fornire una descrizione soddisfacente dell'evoluzione di tali corpi solo a partire dalla precisa determinazione del loro stato iniziale. Si può infatti facilmente mostrare come in tale teoria un piccolo errore o indeterminazione nella definizione delle condizioni iniziali di un sistema fisico possa produrre, dopo un intervallo temporale sufficientemente lungo, una completa indeterminazione nel suo stato finale. Consideriamo a questo scopo un sistema ideale costituito da una pallina perfettamente elastica di massa m che si muove lungo la direzione x tra due pareti perfettamente rigide, e le cui coordinate sono definite rispettivamente dai segmenti delle rette $x = l$ e $x = -l$. Supponiamo ora che la posizione iniziale della pallina quando viene lanciata possa essere definita soltanto con un errore Δx e che venga compiuto un analogo errore Δp_x , nel determinare il suo impulso iniziale p_x . Questo implica che dopo un certo tempo t , noi conosciamo la posizione della pallina con un errore $\Delta x + \Delta p_x \cdot t/m$ che per t molto grande diventa perfino superiore alla distanza $2l$ che divide le due pareti tra le quali essa si muove. In questo modo un piccolissimo errore nella misurazione dello stato iniziale di un sistema fisico si può trasformare in meccanica classica in una completa indeterminazione del suo stato finale. Si può comprendere così come il determinismo risulta essere fondato proprio sull'esistenza di uno

strumento di misurazione ideale dotato di caratteristiche analoghe a quelle del famoso demone di Laplace.

Fino all'avvento della fisica moderna il processo di misurazione è un mero processo di registrazione del dato per tre ragioni principali: la prima è che la misurazione in fisica classica non è mai perturbativa e, nei pochi casi in cui lo è, la perturbazione può essere precisamente calcolata. La seconda ragione è che in fisica classica è necessario misurare con precisione, perché se commettessimo un errore nel processo di misurazione, l'errore teorico potrebbe essere persino superiore all'errore effettivo. La terza è che in fisica classica abbiamo una pluralità di differenti teorie dei fenomeni ottici, meccanici, elettrici, acustici, magnetici e manca, quindi, una teoria fisica fondamentale o unitaria dei diversi processi fisici.

Le nozioni di misurazione non perturbativa e di strumento ideale sono pesantemente messe in discussione già prima dell'avvento della meccanica quantistica con la scoperta dei paradossi dell'interpretazione statistica della termodinamica classica, quando ci si accorge che l'esistenza di uno strumento di misurazione ideale comporta una reversibilità nomologica delle equazioni della fisica che contrasta con il loro carattere irreversibile confermato dall'osservazione macroscopica. Tali contraddizioni emergono nella seconda metà dell'Ottocento dal tentativo di interpretare sulla base dell'ipotesi atomica il comportamento delle osservabili macroscopiche pressione, volume e temperatura. Il primo di questi paradossi fu discusso da Maxwell nella sua *Teoria del calore* del 1871, ove veniva postulata l'esistenza del famoso diavoleto corrispondente secondo la sua stessa definizione a «un essere le cui facoltà sono talmente raffinate da essere in grado di seguire il movimento di ogni molecola, riuscendo a compiere ciò che a noi è attualmente impossibile». Maxwell avrebbe poi dimostrato come una simile possibilità, che equivaleva alla disponibilità di uno strumento di misurazione ideale, fosse in aperta contraddizione con il teorema H di Boltzmann relativo all'incremento dell'entropia in ogni sistema isolato (e con la stessa osservazione macroscopica che forniva una decisiva conferma sperimentale di questo teorema) attraverso un simile ragionamento: supponiamo che un recipiente sia diviso in due parti, A e B , da una parete in cui vi sia un piccolo foro, e che l'essere capace di vedere le singole molecole apra e chiuda questo foro in maniera da permettere il passaggio da A in B delle molecole più veloci e da B in A di quelle più lente. Egli riuscirà così ad alzare la temperatura di B e ad abbassare quella di A senza consumo di ener-

gia, contraddicendo così il secondo principio della termodinamica. Come è stato mostrato qualche anno più tardi, il paradosso del diavoleto rimandava al contrasto irriducibile tra la natura reversibile delle leggi meccaniche, nei termini delle quali si cercava di reinterpretare il comportamento delle osservabili macroscopiche pressione, volume e temperatura e il carattere irreversibile dei processi termodinamici legati alla trasformazione di tali osservabili¹⁹. Per esorcizzare definitivamente il diavoleto di Maxwell e dimostrare così l'impossibilità di esistenza di uno strumento di misurazione ideale si dovrà tuttavia attendere l'avvento della meccanica quantistica. Infatti, il diavoleto di Maxwell viene definitivamente esorcizzato non appena prendiamo in considerazione una struttura più fine del mondo fisico, costituita non più da molecole ma da sistemi atomici e caratterizzata dal principio di indeterminazione. Per separare le particelle *lente* da quelle *veloci* è necessario che il diavoleto sia in grado di stabilire sia la loro posizione, per poter agire in modo opportuno sullo sportello che divide i due recipienti, sia la loro velocità, per poter discriminare tra i due insiemi di particelle. Tuttavia, una precisa determinazione della posizione di ogni particella richiede, da parte del diavoleto, l'uso di una torcia che emetta luce di piccola lunghezza d'onda e quindi di elevata frequenza che perturba la particella stessa, modificando in modo incontrollato la sua velocità. Diversamente, per non modificare la velocità della particella, il diavoleto è costretto a usare luce a frequenza molto bassa che non perturba la particella ma che, a causa della corrispondentemente elevata lunghezza d'onda, comporta un alto grado di imprecisione nella localizzazione spaziale della particella stessa. Il diavoleto non è quindi più in grado di aprire lo sportello al momento opportuno e in questo modo non può più violare il teorema H di Boltzmann. Con l'avvento della teoria quantistica, attraverso il riconoscimento della natura inevitabilmente perturbativa dei procedimenti di misurazione vengono così risolti i paradossi dell'interpretazione statistica della termodinamica classica: esorcizzare il diavoleto di Maxwell significa infatti superare la contraddizione tra la reversibilità delle leggi della meccanica e la irreversibilità dei processi termodinamici. Sembrerebbe così finalmente giunto il momento di realizzare quel naturale processo di inclusione dello strumento misuratore entro la struttura formale delle leggi della fisica, che fino

¹⁹ Cfr. G. Tarozzi, *Teoria e strumento in microfisica*, in «Epistemologia» 8 (1985), pp. 83-118.

al secolo scorso sembrava poter essere ancora evitato²⁰.

4. Il problema di una teoria della misurazione nella fisica quantistica

Nell'anno in cui Lord Kelvin teneva il suo famoso discorso alla *British Association for the Advancement of Science*, nel quale ammetteva l'esistenza di due nuvole all'orizzonte (la difficoltà di coniugare l'esistenza dell'etere con gli esperimenti di Michelson e Morley e l'incapacità della meccanica statistica di spiegare la radiazione emessa da un corpo nero)²¹, Planck mostrava che c'era un altro mondo da scoprire ma che le procedure per indagarlo richiedevano un radicale cambiamento di prospettiva, a causa dei limiti insuperabili posti alla precisione delle nostre procedure di misurazione dovute all'incapacità di tracciare una linea di separazione tra strumento e sistema fisico misurato.

La scoperta di Planck del *postulato quantistico* fondamentale di unità e indivisibilità del quanto di azione h ebbe un impatto profondo nella trasformazione del concetto stesso di misurazione che appare in questo scenario come un processo di inter-azione, dove il termine va inteso nel senso letterale di scambio di azione, cioè di multipli interi della costante h , e comporta quindi una perturbazione inevitabile da parte dell'apparecchio di misurazione sul sistema atomico misurato. Solo in questo contesto si manifesta l'esigenza di descrivere il processo di misurazione (assente in fisica classica) attraverso un'unica teoria formale dei processi fisici. Ciò che emerge dalla misurazione è il fatto che formulare una teoria quantistica della misurazione è controverso, a causa delle implicazioni dovute alle interferenze causate dallo strumento. L'esistenza del quanto di azione di Planck produce infatti una situazione completamente nuova dal punto di vista concettuale rispetto a quella della fisica classica nella descrizione del processo di misurazione: ogni interazione tra il sistema atomico e lo strumento non è più riducibile alla sola registrazione della grandezza misurata dallo strumento, ma comporta invece una inevitabile modifica del sistema atomico. Potremmo anche ottenere un'interazione uguale a zero, ma

²⁰ G. Tarozzi, *Il significato della strumentazione nella storia della scienza*, in G. Tarozzi (ed.), *Gli strumenti nella storia e nella filosofia della scienza*, Edizioni ALFA, Bologna 1983, pp. 185-201; Id., *Teoria e strumento in microfisica*, cit.

²¹ W. T. Kelvin, *Nineteenth-century Clouds Over the Dynamical Theory of Heat and Light*, «Philosophical Magazine», Series 6, 2/7 (1901), pp. 1-40.

ciò vorrebbe dire che non si è compiuta alcuna osservazione e non si è acquisita alcuna conoscenza sulle proprietà del sistema atomico.

In fisica quantistica l'interazione tra strumento e sistema non è eliminabile né praticamente né concettualmente, come avveniva in fisica classica. Questo perché tra strumento e oggetto avviene sempre uno scambio di energia per un intervallo t o la cessione di una certa quantità d'impulso su una distanza spaziale. La naturale assunzione che il formalismo quantistico descriva anche lo strumento al pari degli altri sistemi fisici, come oggetto della teoria, è però all'origine di una serie di gravi difficoltà, che sono generalmente note come problema quantistico della misurazione, una delle principali e più controverse questioni aperte nell'attuale filosofia della fisica. Allo scopo di discutere brevemente l'origine formale del problema della misurazione in meccanica quantistica, consideriamo una situazione fisica nella quale un apparato sperimentale A interagisce per un certo periodo di tempo con un sistema atomico S . Si assume che A si trovi, prima della misura, in qualche stato "fondamentale", corrispondente per esempio alla posizione zero della lancetta sulla scala dello strumento che mostrerà il risultato della misura, e che S sia in un autostato dell'osservabile fisica B che verrà misurata. Affinché l'interazione fra A ed S sia una misurazione occorre che A sia in grado di informare lo sperimentatore che l'osservabile B ha un valore b_k . Se ciò avviene, l'interazione produce un cambiamento dello stato di A . Quindi lo stato finale ($A + S$) dopo la misurazione sarà dato dalla trasformazione del vettore di stato dell'apparato strumentale A e dal vettore di stato del sistema misurato S . In fisica quantistica non si può affermare che lo stato del sistema misurato rimanga assolutamente inalterato. Non è noto infatti alcun tipo di osservazione che permetta di misurare, ad esempio, l'energia di un elettrone senza perturbarlo; proprio perché si verifica un'interazione tra A e S a causa di un qualche scambio di energia tra tali sistemi. La meccanica quantistica descrive, come è noto, l'evoluzione temporale dei vettori di stato attraverso l'equazione di Schrödinger. È noto che le prime difficoltà della teoria quantistica della misurazione nascono proprio dalle conseguenze dell'equazione di Schrödinger. A proposito di tale equazione, Araki e Yanase dimostrarono un teorema sulla base del quale le conseguenze possono essere accettate solo se l'operatore B , corrispondente all'osservabile B , commuta con tutti gli operatori che rappresentano quantità conservate di tipo additivo per il sistema $S + A$. Si tratta di un teorema talmente restrittivo che quasi nessuna

osservabile quantistica può soddisfarlo, dal momento che l'energia e l'impulso non commutano con le componenti del momento angolare, queste ultime non commutano tra loro, e così via. Una soluzione parziale delle difficoltà sollevate da questo teorema fu trovata da Wigner e dallo stesso Yanase che dimostrarono l'impossibilità di evitare un "errore" nella misurazione di una qualsiasi grandezza osservabile, dato che esiste sempre una probabilità finita che lo stato dell'apparato A non risulti correlato con lo stato del sistema misurato S , ma che la probabilità di errore può essere resa arbitrariamente piccola rendendo A sempre più "grande". In particolare, Yanase riuscì a definire un limite superiore alla precisione della misurazione nei termini della grandezza dell'apparato, essendo questa grandezza definita con una funzione della quantità misurata dall'apparato stesso. Le implicazioni del teorema di Araki e Yanase mostrano come la meccanica quantistica fornisca una descrizione insoddisfacente dell'interazione tra apparato misuratore e sistema fisico misurato, perfino nel caso più semplice in cui tale sistema si trova già in un autostato dell'osservabile fisica che viene misurata. Va inoltre rilevato che il carattere macroscopico dello strumento non appare, sulla base delle precedenti considerazioni, un mero fatto contingente, dovuto alle dimensioni macroscopiche dei nostri organi di senso, secondo un noto *leit-motiv* dell'interpretazione ortodossa, ma come una necessità formale in base alla quale quanto più sono accurati i risultati delle nostre misure, tanto più lo strumento tende a sottrarsi a una descrizione teorica da parte del formalismo quantistico. Queste difficoltà si rivelano comunque secondarie quando vengono confrontate con il problema della riduzione del pacchetto d'onda, che nasce dall'impossibilità di fornire una spiegazione logicamente consistente della transizione da uno stato iniziale di sovrapposizione a un ben definito stato finale, come risultato del processo di misurazione. Questo risultato contraddittorio viene superato dalla meccanica quantistica attraverso un'ipotesi *ad hoc*, il noto postulato o assioma di riduzione secondo il quale, dopo la misurazione, un sistema fisico non si trova più in uno stato di sovrapposizione ma in uno stato ben definito. Il prezzo che si deve pagare per ottenere questo risultato è tuttavia molto alto dato che vengono così riconosciute all'interno della teoria due differenti e irriducibili modalità di evoluzione del vettore di stato. Da un lato, infatti, le normali interazioni tra due sistemi atomici, o tra un sistema atomico e un oggetto macroscopico che non sia un apparato di misura, sono caratterizzate da un'evoluzione deterministica

regolata dall'equazione di Schrödinger, che descrive naturalmente anche l'evoluzione dei singoli sistemi che non interagiscono, mentre, dall'altro, il processo di misurazione provoca invece una transizione discontinua dallo stato iniziale a uno degli stati finali di cui possiamo prevedere soltanto le differenti probabilità, come affermato dall'interpretazione di Born. Appare così chiaro che, secondo la meccanica quantistica, vi è una profonda differenza tra processo di misurazione e "normale" interazione fisica che avviene tra due qualsiasi oggetti. Il processo di misurazione non può essere considerato semplicemente come un'interazione tra l'oggetto fisico *strumento* e l'oggetto fisico *sistema misurato*²². Per evitare una simile conclusione, si è introdotto il postulato di riduzione della funzione d'onda, secondo il quale il sistema misurato è sempre in uno stato ben definito al termine del processo di misurazione. Per spiegare questo risultato sono state proposte differenti teorie della misurazione classificabili in quattro gruppi a seconda della risposta che esse forniscono al problema del passaggio da una sovrapposizione di diversi stati fisici a un preciso stato finale²³.

Le difficoltà connesse ai processi di misurazione hanno portato all'elaborazione di procedure comparative di misurazione, ovvero ai cosiddetti *Yes/No Experiments* di Jauch e Piron. Gli *Yes/No Experiments* sono particolari procedure di misurazione di un sistema fisico che ammettono come risultato solo due possibili alternative. Infatti, essi sono concettualmente caratterizzati dalla nota legge aristotelica del terzo escluso. Secondo tale legge, data una qualsiasi proposizione *A*, si possono avere solo due eventualità: o *A* è vera oppure è vera la sua negazione. In altre parole, il verificarsi di uno dei due eventi impedisce o preclude l'accadere dell'altro²⁴. Per comprendere il significato degli *Yes/No Experiments* presentiamo in forma leggermente modificata l'esempio proposto da Piron²⁵. Abbiamo bisogno di un uovo e

²² G. Tarozzi, *La scienza degli strumenti come problema della misurazione*, «Giornale di Fisica» 29 (1988), pp. 239-252; Id., *Quantum Measurements and Macrophysical Reality: Epistemological Implications of a Proposed Paradox*, «Foundations of Physics» 26 (1996), pp. 907-917.

²³ Cfr. G. Tarozzi, *Teoria e strumento in microfisica*, cit.; Id., *La scienza degli strumenti come problema della misurazione*, cit.

²⁴ J. Manyahi, *Student Challenges in Understanding Quantum Mechanics: Effect of the "Logic paradigm shift"*, «Journal for Foundations and Applications of Physics» 7/1 (2020), pp. 32-42.

²⁵ C. Piron, *Survey of General Quantum Physics*, «Foundations of Physics» 2 (1972), pp. 287-314; J. M. Jauch, *Foundations of Quantum Mechanics*, Addison-Wesley publish-

di un calibro di ampiezza regolabile. L'obiettivo è misurare la taglia dell'uovo. La domanda associata a questa misurazione è composta dalla combinazione delle due domande $Q_1 = \text{«l'uovo è piccolo?»}$ e $Q_2 = \text{«l'uovo è grande?»}$. La prima ha risposta positiva se l'uovo passa attraverso il calibro con un'apertura di piccolo diametro. Mentre la seconda domanda corrisponde al fatto che l'uovo non passa attraverso il calibro con un'apertura di piccolo diametro e, quindi, è necessario allargare l'apertura. La combinazione domande/risposte e la loro relazione costituisce una struttura logica di un reticolo. Le risposte, infatti, possono essere interpretate come proposizioni vere o false e quindi possono essere impiegate come entità fondamentali per la costruzione del formalismo matematico. Vediamo come funziona l'esperimento. Prendiamo un uovo di cui non conosciamo la taglia e ci chiediamo se l'uovo è piccolo. Se l'uovo non passa nell'apertura di piccolo diametro, allora la risposta è negativa. Procediamo allargando il diametro dell'apertura e quindi ci domandiamo se l'uovo è grande. Se la risposta è positiva, allora dobbiamo ancora allargare il diametro; invece, se la risposta è negativa, allora dobbiamo ridurre il diametro dell'apertura. Alla fine dei nostri *Yes/No Experiments* non otterremo la dimensione reale dell'uovo, ma avremo solamente la misurazione *approssimativamente* più precisa dell'uovo. È da precisare che l'idea di taglia che noi avremo al termine dell'esperimento corrisponderà alla combinazione di domande e risposte²⁶.

A un livello più generale, possiamo descrivere l'esperimento nel modo seguente. Si prende il valore di una certa variabile e si chiede in quale intervallo stia. Se il valore non è all'interno dell'intervallo che abbiamo individuato, allora ampliamo l'intervallo; invece se il valore è all'interno dell'intervallo, allora lo restringiamo. Il risultato che otterremo è un'approssimazione del valore di una variabile che coincide con un intervallo e non con un numero. Ci sembra che gli *Yes/No Experiments* impieghino procedure di tipo comparativo. Infatti, lo scopo di tali *esperimenti* non è quello di quantificare con precisione la variabile sottoposta a misurazione, ma ottenere un'approssimazione del valore di tale variabile mediante una serie di comparazioni tra

ing Com-pany, Massachusetts 1968; O. Bjørnstad, *A Note on the So-Called Yes-No Experiments and the Foundations of Quantum Mechanics*, «Synthese» 29 (1974), pp. 243-253.

²⁶ M. Trassinelli, *Relational Quantum Mechanics and Probability*, «Foundations of Physics» 48 (2018), pp. 1092-1111.

l'oggetto da misurare (variabile) e l'intervallo di riferimento. Gli *Yes/No Experiments* presentano molte delle caratteristiche associabili ai concetti comparativi fissate da Carnap; tuttavia c'è una differenza che segnaliamo. La procedura mediante la quale Carnap stabilisce i criteri per delineare il concetto comparativo di peso ha come fondamento la relazione logica tra $peso_1$ e $peso_2$ rispetto allo strumento di comparazione *bilancia*; mentre nel caso degli *Yes/No Experiments* la relazione è tra gli strumenti di comparazione $intervallo_1$ e $intervallo_2$ rispetto alla variabile sottoposta alla procedura di comparazione.

Conclusioni

A differenza di quanto emerge da una lunga tradizione storiografica riconducibile ai fondamentali lavori di Koyré e Kuhn, nei quali si difende l'idea di un progresso scientifico contrassegnato da rotture epistemologiche, la più significativa delle quali consiste in quel passaggio diretto da un'interpretazione qualitativa a una descrizione quantitativa del mondo che porta alla nascita della scienza moderna, in questo contributo abbiamo cercato di argomentare a favore di una maggiore continuità nell'evoluzione storica dei concetti scientifici. Una tale continuità è stata evidenziata da Carnap nel caso dell'evoluzione logica dei concetti della scienza, mettendo in luce la funzione imprescindibile di un terzo tipo di concetti, quello dei concetti comparativi, e il suo ruolo decisivo nella transizione logica dai concetti qualitativi a quelli quantitativi della scienza. Abbiamo mostrato come questa prospettiva carnapiana di una continuità nell'evoluzione logica possa essere proficuamente estesa anche alla ricostruzione dell'evoluzione storica dei concetti della scienza.

Abbiamo rilevato come nella fisica classica il processo di misurazione, che è alla base della rivoluzione scientifica e ha consentito l'applicazione della matematica all'esperienza, appare come un mero atto di registrazione del dato empirico da parte dello strumento anche in quelle situazioni in cui la misurazione ha natura perturbativa. La situazione muta radicalmente con la scoperta di Planck del suo fondamentale *postulato quantistico*, da cui deriva l'importante conseguenza che ogni processo di misurazione è in realtà un'interazione e quindi comporta una perturbazione inevitabile da parte dell'apparato di misurazione sul sistema fisico misurato. Questa visione di un'evoluzione più graduale da una scienza delle proporzioni, che si

afferma già nel periodo rinascimentale con la sostituzione dei vecchi concetti qualitativi caratteristici delle metafisiche antiche e medievali con i nuovi concetti comparativi negli ambiti più avanzati della ricerca, a una vera e propria fisica basata su concetti metrici quantitativi porta con sé l'esigenza di descrivere i limiti e le potenzialità della misurazione. Questa esigenza si radicalizzerà, dopo lo sviluppo graduale della fisica in campo meccanico e astronomico nel XVII secolo, a seguito dell'estendersi del processo di matematizzazione alle scienze baconiane come ottica, elettricità, magnetismo e teorie del calore, raggiungendo la sua piena maturità della seconda metà dell'Ottocento. Tuttavia, soltanto con l'avvento della fisica quantistica la necessità di descrivere l'interazione tra apparato di misurazione e sistema fisico misurato porterà a sviluppare vere e proprie teorie della misurazione. Questa elaborazione di una teoria della misurazione dovrà affrontare non solo le difficoltà connesse alla natura incontrollabile della perturbazione causata dallo strumento macroscopico sull'oggetto microscopico misurato, ma anche i problemi formali irrisolti su cui ci siamo in precedenza soffermati. Abbiamo visto, infine, come una possibile soluzione a quest'ultimo problema potrebbe configurarsi – è il caso degli *Yes/No Experiments* – come un “ritorno” a una scienza basata su procedure di tipo comparativo, analoghe a quelle che erano state elaborate nella scienza rinascimentale.

Riteniamo che il percorso storico e concettuale che abbiamo delineato dimostri l'importanza dei concetti comparativi, non solo nella nascita della scienza moderna ma anche in alcuni significativi sviluppi della scienza contemporanea.

Università degli Studi di Urbino

davide.pietrini@uniurb.it

gino.tarozzi@uniurb.it

