

**BUONE PRASSI****La giusta misura****di Maurizio Salvarani, Luca Malagoli**

L'esecuzione di una misura, azione quotidiana, spesso viene compiuta in modo inconsapevole sia per quanto riguarda le modalità di realizzazione e di riproposizione dei risultati, sia per la poca consapevolezza sulle difficoltà che la accompagnano. Per queste ragioni assume un carattere molto importante l'educazione alla misura e al trattamento dei dati connessi, proprio a partire dagli alunni dei primi anni della scuola primaria. E un museo dedicato ad uno strumento, la bilancia, ontologicamente connesso al concetto di misura e basato sulla precisione può diventare il veicolo giusto per lavorare in questa direzione.

**1. Il significato della misura**

Misure di lunghezza, misure di tempo, misure di massa e misure di peso, misure di energia, di potenza e di forza, di temperatura, di velocità e di accelerazione, misure di portata e di capacità, e molte altre, tutte quelle di cui siamo a conoscenza. Un'azione, quella del misurare, nota a tutti e certamente eseguita dalla maggior parte delle persone di qualsiasi età ed estrazione sociale e formazione culturale; basta pensare alla misurazione della temperatura corporea, eseguita almeno una volta da ogni essere umano nel corso della vita. La familiarità con un'azione può portare a ritenere la stessa semplice, quasi banale; ma si tratta pur sempre di un'operazione a sfondo scientifico ed essere in grado di eseguire una misura in modo scientificamente corretto è un'operazione con una certa, nascosta, difficoltà, anche per chi si crede, ed è, capace. Non tanto per difficoltà connesse con l'atto della misura, quanto, piuttosto, per le implicazioni presenti nel momento in cui il risultato della misura deve essere reso disponibile a tutti gli interessati, e deve, contestualmente, essere leggibile in modo univoco da chiunque desideri ottenere informazioni in merito (uniformità della forma e dell'unità di misura). La misurazione è una parte fondamentale [1] nel complesso percorso associato all'esecuzione di un esperimento, il cui canone fondamentale per rendere l'esercizio sperimentale significativo risiede nella riproducibilità dello stesso in ogni momento e in ogni luogo del globo, con la certezza di ottenere sempre lo stesso risultato della misura in considerazione.

A questo punto è chiaro come la riproducibilità implica la condivisione della forma in cui il risultato è presentato, ovvero la condivisione della forma con cui il valore della misura oggetto dell'esperimento viene reso pubblico. E in questo caso la forma è sostanza. L'origine della difficoltà, liberato il campo dalle differenti formazioni individuali, è da ricercare nel concetto stesso di misura. Cosa significa effettuare una misura? Cosa significa associare al valore di un determinato oggetto, in funzione delle sue caratteristiche fisiche (come lunghezza, massa, peso, durata, energia) un numero? Come rendere universale il risultato di una misura? Già nella frase "quel tavolo è lungo ..." sono nascoste una serie di ostacoli e di possibili imprecisioni maggiori di quanto si possa sospettare. In questa seconda parte del lavoro si vogliono sollevare le difficoltà evidenziate nelle righe precedenti per cercare una risposta e proporre possibili soluzioni.

Il primo punto su cui concentrarsi per chiarire alcuni dubbi è legato al significato di effettuare una misura. Escludendo difficoltà legate alla sua realizzazione, anche nei casi di strumentazioni complicate, misurare possiede un meta-significato ben oltre il valore etimologico del termine. Il processo di misura trova il suo compimento nel momento in cui viene fornito il risultato, la cui caratteristica principale, assieme alla correttezza, risiede nella universalità di lettura; in altre parole non avrebbe particolare significato eseguire delle misure prive di corrispondenza numerica precisa, così come non sarebbero di nessuna utilità misure il cui valore venisse interpretato a seconda del lettore. Si può vedere quest'ultimo aspetto come un carattere di rigidità dell'operazione, ma forse è più corretto e interessante vederlo in termini di possibilità di comunicare con precisione e chiarezza, tratti distintivi del misurare. In altri termini il misurare si può vedere come l'estrapolazione dall'oggetto di alcune sue caratteristiche pregnanti e nascoste a prima vista e proprio per questo motivo decisamente importanti, e lo strumento di misura come il traduttore, in un linguaggio a noi noto, delle caratteristiche fisiche dell'oggetto sotto esame. Si è davanti a un "estetica della misura" e "dell'atto di misurare". Le scienze della Natura sono ontologicamente legate a un canone di bellezza coniugato in termini di semplicità delle leggi sottese ai fenomeni. Assieme alla bellezza materiale, visibile, dei fenomeni naturali è presente una bellezza nascosta, e forse proprio per questa sua caratteristica, ancor più intrigante. Si pensi, ad esempio, al millenario ripetersi del moto della Luna attorno alla Terra; col calar della luce il levarsi nel cielo notturno del nostro satellite di cui ammirare la superficie o di cui utilizzare la luce riflessa per muoversi nel buio della notte, è fenomeno noto ma non di meno stupefacente. Non da minor stupore si rimane colpiti nell'apprendere il moto lunare governato da un numero il cui valore è ben determinato, è stato misurato e non può essere altro. La legge di gravitazione universale [2] regola il moto orbitante di un pianeta, se e solo se al denominatore il valore dell'esponente è 2 (due), non 1,99999 o 2,00001. E, fatto ancor più sorprendente, la stessa legge anche se riferita a costanti diverse, in egual modo regola le forze elettriche a livello atomico.

Il canone estetico raggiunge il suo apice con la determinazione delle costanti fisiche, parametri imprescindibili nella descrizione e nella comprensione della Natura, i cui valori sono continuo oggetto di misura e di perfezionamento.

La scelta, ormai prossima al suo completamento, di basare i campioni delle unità del Sistema Internazionale sulle costanti fondamentali della fisica chiarisce meglio di molte parole e di altrettanti esempi l'ontologia della misura, specifica in modo chiaro e inequivoco la necessità di misurare, ad esempio, il valore della velocità della luce con precisione sempre maggiore.

**2. La stima di una misura**

Per la verifica sperimentale sono necessarie una serie di operazioni prima e durante la misurazione, dal cui buon esito trae vantaggio la misura stessa. Prima di tutto è fondamentale avere un'idea di cosa si vuole misurare e di qual è lo strumento idoneo all'atto. Già in questa prima fase è contenuta tutta la difficoltà dell'operazione e la conseguente necessaria attenzione e delicatezza. La scelta dello strumento idoneo richiede una preliminare capacità di effettuare una stima sufficientemente precisa del risultato atteso. È il momento in cui è importante essere in grado di ragionare in termini di ordini di grandezza (OdG) per poter valutare il risultato atteso (vedi Appendice). Ragionare per ordini di grandezza è un'operazione di una certa complessità, in quanto bisogna essere in grado di stimare preventivamente il risultato assieme ai parametri ad esso connessi; di contro i calcoli eseguiti con questo sistema risultano particolarmente agevoli essendo limitati all'uso della prima decade di numeri reali, una volta a conoscenza della notazione scientifica [3]. Nella storia della fisica il caso più conosciuto ed eclatante di scienziato capace di stimare in modo preventivo per ordini di grandezza fu, senza dubbio alcuno, quello di Enrico Fermi. Sono indimenticabili alcuni suoi esempi di tale tipo di calcoli; basta ricordare il famoso episodio avvenuto in occasione del test della prima bomba atomica della storia. Una parte degli scienziati coinvolti nel progetto si trovavano ad Alamogordo, nel deserto del New Mexico, di notte, posizionati in modo convenuto, a grande distanza, tutti attorno al traliccio su cui era stato installato il terribile ordigno [4]. La bomba venne sganciata e l'esplosione ebbe luogo, prima di tutto a livello visivo; in quel preciso momento il fisico originario di Roma si alzò in piedi dal suo bunker lasciando cadere alcuni piccoli pezzetti di fogli di carta precedentemente preparati; lo scopo era una prima e approssimativa valutazione del potenziale dell'esplosione, realizzabile valutando la distanza dal punto di rilascio a cui detti pezzetti di carta sarebbero caduti per effetto dello spostamento d'aria causato dall'esplosione. Ovviamente, al ritorno nei laboratori per i calcoli precisi delle grandezze coinvolte nell'esplosione, i valori stimati da Fermi con il suo sistema risultarono del tutto corretti. Un altro esempio molto famoso e legato a momenti meno drammatici ricorda come il Papa [5] fosse solito proporre ai suoi studenti dei problemi, noti oggi come Fermi questions [6], in cui venivano chieste stime di grandezze tra le più diverse. Un efficace metodo per imparare il calcolo per ordini di grandezza [7]. Ragionare per ordini di grandezza significa avere un'idea della decade [8] entro cui ricercare l'atteso risultato corretto; non significa affatto cercare di avvicinarsi quanto più possibile al valore della misura. Dal punto di vista dell'ordine di grandezza non corre alcuna differenza tra 20 e 40, ovvero tra 1500 e 1800. Nel primo caso si è davanti a una misura dell'ordine delle decine di unità, mentre nel secondo delle migliaia. In Appendice è disponibile una sintetica spiegazione della notazione scientifica. A questo punto dovrebbe essere chiaro il motivo vero e profondo per cui è importante scegliere lo strumento di misura idoneo solo dopo una valutazione dell'ordine di grandezza: appoggiare sul piatto di una bilancia da cucina un sacco di cemento porterà come unico risultato la rottura dello strumento di misura. D'altra parte valutare il valore della massa di un gioiello con la precedente bilancia da cucina non permetterebbe di apprezzare alcuna misura.

**3. La misura esatta e quella corretta**

Una volta terminata la fase preliminare dedicata alla stima e alla determinazione dello strumento idoneo alla misura da effettuare, ci si appresta all'esecuzione del rilievo sperimentale; diventa, quindi, necessario parlare della differenza tra misura esatta e misura corretta, ovvero è bene ragionare sull'esistenza delle misure esatte.

Dal punto di vista della fisica la misura esatta non esiste [9], non può esistere; la misura, intesa come risultato del confronto tra l'oggetto di cui misurare una proprietà e lo strumento di misura scelto per l'operazione, è strettamente legata allo strumento stesso misura utilizzato, fino al punto in cui può essere quest'ultimo a influenzare lo stato finale del sistema da misurare, come accade nel caso della fisica quantistica, in cui l'intervento dello strumento può provocare la modificazione dello stato del sistema [10].

Da cosa è determinato il legame tra il dispositivo di misura utilizzato e la misura stessa? Da un punto di vista epistemologico la misura non esiste fino a quando non interviene lo strumento di misura; è quest'ultimo che permette alla misura di prendere forma e valore, indipendentemente dal tipo di strumento utilizzato, sia esso moderno e raffinato, ovvero antropometrico. Da un punto di vista pratico il legame è dato dalle caratteristiche dello strumento, in particolare da due parametri posseduti obbligatoriamente, in ogni caso: la sensibilità e la portata. Il primo è definito come il valore più piccolo, diverso da zero, apprezzabile dallo strumento, mentre il secondo corrisponde al valore massimo misurabile dallo strumento utilizzato [11]. In quest'ultimo caso l'influenza sulla misura è limitata all'esistenza di un limite superiore da rilevare, mentre il legame tra sensibilità e valore della misura è molto forte, per un duplice aspetto:

1 – dalla definizione di sensibilità risulta chiaro come anche lo strumento di misura più preciso esistente, all'atto operativo limita la precisione della misura alla sua sensibilità.

Il procedimento di misura consiste, in pratica, nel confronto tra l'oggetto da misurare e lo strumento stesso, nel tentativo di trovare una corrispondenza tra le due entità. Quando la corrispondenza cercata trova soddisfazione si è giunti all'esplicitazione della misura, cioè alla lettura, sullo strumento, del valore cercato dell'oggetto misurato. Il limite imposto alla misura dallo strumento diventa chiaro; se, ad esempio, ci si appresta a determinare il valore della massa di un oggetto utilizzando una bilancia capace di apprezzare fino al grammo, non sarà mai possibile conoscere i valori dai decigrammi a scendere verso gli ordini di grandezza più piccoli. Almeno fino a quando non si decide di cambiare lo strumento di misura con uno caratterizzato da una sensibilità maggiore.

2 – la sensibilità indica l'intervallo di variabilità a cui la misura certamente appartiene; è un concetto fondamentale in quanto svolge una duplice funzione: spiega come la misura cade, con certezza, entro un determinato intervallo di valori, e, di conseguenza, esplicita la non esistenza della misura esatta, intesa come risultato abbinato a un unico valore.

Non esiste la misura esatta. Si tratta di un concetto teorico imprescindibile, non legato né alla qualità dello strumento di misura né all'abilità dello sperimentatore, ma dovuto esclusivamente alla teoria della misura: la misura esatta non esiste, non può esistere. Esistono misure più o meno precise, ma ognuna ha un suo limite reso evidente dal metodo con cui il risultato della misura viene riportato. Da un punto di vista fisico affermare, ad esempio, quel tavolo ha un lato lungo 165 centimetri non ha alcun senso in quanto viene indicata una misura precisa, esatta: è proprio 165 cm, non 164 o 166? Da un punto di vista fisico è corretto indicare la misura rilevata assieme all'intervallo entro cui, con certezza, il valore è compreso.

**4. Gli errori associati alla misura**

Nei paragrafi precedenti si è parlato della necessità, per lavorare correttamente da un punto di vista scientifico, di introdurre il concetto di intervallo di misura, inteso come la gamma dei valori possibili per la misura in oggetto, così da poter affermare la certezza dell'appartenenza del valore all'intervallo indicato. Si può vedere questo sistema come un'evoluzione del concetto di misura legato a un singolo valore,



1x10 <sup>-9</sup>	nano	n	Miliardesimo	0,000000001
1x10 <sup>-12</sup>	pico	p	Bilionesimo	0,000000000001
1x10 <sup>-15</sup>	femto	f	Biliardesimo	0,000000000000001
1x10 <sup>-18</sup>	atto	a	Trilionesimo	0,00000000000000001
1x10 <sup>-21</sup>	zepto	z	Triliardesimo	0,0000000000000000001
1x10 <sup>-24</sup>	yocto	y	Quadrilionesimo	0,000000000000000000001

Come risulta dalla tabella il numero di zeri presenti nella colonna di destra coincide con il numero posto a esponente del dieci presente nella prima colonna di sinistra; è il valore relativo all'ordine di grandezza.

Diventa ancora più evidente il motivo per cui è importante saper ragionare in termini di ordini di grandezza: un errore di anche solo pochi ordini di grandezza equivale a una differenza numericamente importante.

#### Note

[1] Sia dal punto di vista della storia della scienza, sia dal punto di vista dell'epistemologia, la misura rappresenta il passaggio fondamentale per consentire ad una teoria di essere definita scientifica, e, contemporaneamente, non falsa, almeno fino a quando un nuovo esperimento eseguito in modo corretto e coerente con le ipotesi non ne decreta la perdita di validità.

[2] Si tratta della famosa legge frutto del lavoro di diversi scienziati come Kepler, Galilei e Newton:  $F12=G \cdot m1 \cdot m2/d2$

[3] Pur essendo normalmente introdotta nei primi anni della scuola secondaria di secondo grado, è mia personale convinzione l'importanza e la possibilità di iniziare alla notazione scientifica gli alunni già a partire della scuola primaria.

[4] ... chiamato dagli addetti ai lavori Il gingillo, termine ben lontano dalla sua reale, e nota, natura.

[5] Nessuna irriverenza: si tratta soltanto dell'appellativo con cui veniva chiamato Fermi all'interno del gruppo di fisici di via Panisperna, da lui diretto prima della sua forzata partenza per gli Stati Uniti, a causa delle orrende leggi razziali promulgate dal regime fascista operante in Italia all'epoca.

[6] È possibile rintracciare questi famosi problemi sugli ordini di grandezza attraverso una semplice ricerca in Internet con qualsiasi motore di ricerca.

[7] Una delle più famose Fermi questions è la seguente: "How many piano tuners are there in Chicago?", cioè: "Quanti accordatori di pianoforte ci sono a Chicago?"

[8] Cioè se si tratta di decimi, centesimi, unità, decine, centinaia, migliaia, ecc.

[9] Per poter liberare il discorso da ulteriori problemi prima di procedere oltre è necessaria una precisazione. Il postulato zero alla base del ragionamento consiste nel ritenere l'operatore in grado di eseguire la misura scevra da errori. Considerare anche questa variabile non porterebbe informazioni aggiuntive utili al discorso, sarebbe solo un'inutile complicazione.

[10] Secondo la formulazione ortodossa e prevalente nel caso della meccanica quantistica uno dei problemi principali è dovuto all'impossibilità di determinare lo stato del sistema su cui si vuole effettuare la misura; infatti l'intervento dello strumento di misura potenzialmente può modificare lo stato del sistema stesso, rendendo di fatto impossibile stabilire se lo stato misurato è quello reale prima dell'intervento dello strumento, ovvero quello modificato dallo strumento. È il problema noto con il nome di esperimento (mentale) del gatto di Schrödinger, ogni tanto indicato anche come "paradosso di Schrödinger", ma non di paradosso si tratta.

[11] Ogni strumento di misura fornisce sempre i due parametri indicati; in alcuni casi sono determinabili direttamente dalla scala di misura riportata dallo strumento – come nel caso di molti dei misuratori di lunghezza – mentre in altri sono riportati in forma scritta sullo strumento, come accade per le bilance. Esiste anche una terza possibilità, vera per alcuni tipi di strumenti: l'indicazione di tali parametri all'interno del manuale di istruzioni allegato.

[12] Si tratta del Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), con sede a Parigi, <http://www.bipm.org/>

[13] In ogni caso si tratta di composizione di strumenti di grandi dimensioni e peso; la presenza del timbro (punzone) riprodotto lo stemma dell'ente deputato alla conservazione dei campioni di unità di misura, era segno di validità e di correttezza della taratura e della scala di misura dello strumento.

Mi piace