



*arte e scienza dell'invenzione*



## LA CONTROVERSIA SULL'EQUILIBRIO

Archimede fu una figura centrale della scienza rinascimentale e un modello per i suoi protagonisti, molti dei quali tentarono di emularne l'opera. Egli compendia infatti svariate caratteristiche a loro comuni, essendo stato un ingegnere-scienziato volto sia alla teoria sia alla pratica, tanto alla matematica quanto alla tecnologia militare. Le sue opere fornivano una prova tangibile della possibilità di descrivere e dimostrare proprietà fisiche quali la legge della leva o la posizione del centro di gravità in un corpo solido in termini rigorosamente matematici. La sua eredità racchiudeva quindi la promessa – fondamentale per la scienza moderna – di creare una rigorosa scienza matematica della natura. Dal XV al XVII secolo, intellettuali di spicco come Leonardo da Vinci, Francesco Maurolico, Federico Commandino, Guidobaldo del Monte e Galileo Galilei rivaleggiarono con lui e lo ammirarono tanto da definirlo "divino". Purtroppo, però, il lavoro di Archimede sopravvisse solo in parte nel Rinascimento. Neppure la fondamentale opera di Erone sulla meccanica – basata sugli scritti di Archimede e ancora punto di riferimento per la scienza araba – era disponibile all'epoca, tranne alcuni estratti nell'opera di Pappo di Alessandria. Gli scienziati rinascimentali non furono quindi in grado di continuare a sviluppare la scienza della meccanica dal punto in cui Archimede ed Erone l'avevano lasciata. Si trovarono di fronte a un quadro estremamente frammentario che dovettero completare attingendo a testi antichi, seguendo la tradizione degli umanisti e, ancor più importante, basandosi sul proprio ingegno. La ricostruzione delle scoperte degli antichi predecessori fu quindi d'importanza basilare per il lavoro dei primi scienziati moderni.

La prima ricostruzione moderna della scienza archimedeica avvenne in un contesto per molti aspetti radicalmente diverso rispetto all'epoca in cui era sorta. Nel frattempo, l'opera di un altro autore aveva assunto una preminenza intellettuale e istituzionale che sarebbe stata difficile da immaginare nel mondo antico. Le opere di Aristotele erano infatti diventate la colonna portante del sapere in tutta l'Europa e nel mondo mediterraneo. Gli studi e l'apprendimento basati sulla sua filosofia si svolgevano in istituzioni con un'autorità, un'affluenza e una capacità di attrazione intellettuale di gran lunga superiori alle scuole e accademie dell'antichità. Le università medievali avevano prodotto una sintesi di filosofia aristotelica e dogma cristiano che si era affermata come la più autorevole visione del mondo, mentre il *corpus* aristotelico assunse un ruolo fondamentale nell'insegnamento della scienza.

Sin dal Medioevo, le città dell'Europa furono teatro di rivoluzionari sviluppi, che portarono a un incremento senza precedenti della ricchezza e del potere, all'ascesa di una borghesia mercantile e di una nuova classe di intellettuali, gli scienziati-ingegneri.

Questi presero come modello Archimede, un punto di riferimento che servì anche per dare dignità alla loro professione. Il loro ambito di interesse spaziava dalle grandi imprese militari dell'epoca ai progetti urbanistici, dalla costruzione di navi alla realizzazione di nuove macchine o strumenti astronomici. Costoro affrontarono le sfide della tecnologia a loro contemporanea combinando conoscenze pratiche e teoriche e servendosi dell'insegnamento di scienziati antichi, come per esempio Archimede. Nello scenario urbano policentrico della prima Europa moderna ebbero la possibilità di lavorare a progetti diversi per diversi committenti e furono di conseguenza estremamente mobili. In tali circostanze, le loro ricerche di meccanica assunsero un carattere profondamente diverso rispetto a quelle condotte dai loro precursori antichi, ma anche rispetto

agli sviluppi successivi della meccanica classica. Potremmo quindi definire questo ambito intellettuale "meccanica preclassica". Dato che la visione onnicomprensiva del mondo basata sulla filosofia naturalista aristotelica fu il retroterra culturale ampiamente accettato di tale meccanica preclassica, sarebbe stato difficile trascurare implicazioni astronomiche e cosmologiche delle spiegazioni meccaniche. Di conseguenza, le spiegazioni meccaniche del movimento planetario o delle maree che troviamo negli scritti di Galileo non furono un caso isolato e contribuirono a quella che è stata definita "meccanizzazione della visione del mondo". Questo sviluppo del sapere scientifico non avvenne per accumulazione graduale di intuizioni, bensì attraverso un'integrazione di nuove conoscenze nel corpo dello scibile trasmesso e, al contempo, una riorganizzazione della sua struttura concettuale. Il carattere aristotelico della meccanica preclassica influì anche sulla concettualizzazione del movimento, in particolare attraverso la distinzione canonica tra movimento violento e naturale. Tale distinzione fu applicata persino dagli artiglieri per spiegare perché un proiettile, fuoriuscendo dal cannone, seguisse dapprima una traiettoria rettilinea, spinto dalla forza violenta della polvere da sparo, per poi scendere verticalmente verso il suolo, con un moto naturale, cercando di raggiungere il centro del mondo. La meccanica preclassica si occupò degli oggetti della tecnologia contemporanea, tentando di spiegarli in una cornice aristotelica più o meno rigida, ma avvalendosi pure di altre risorse intellettuali disponibili, in particolare quelle custodite negli scritti di Archimede. Così, vari autori rinascimentali tentarono di descrivere il movimento di caduta in un mezzo come l'aria o l'acqua adottando l'approccio di Aristotele insieme a quello di Archimede, invocando il principio di estrusione di quest'ultimo per spiegare il ruolo del mezzo.

La meccanica preclassica teneva assieme componenti eterogenee e talvolta persino in conflitto tra loro, sviluppando un sistema concettuale che sarebbe stato abbandonato soltanto con la nascita della meccanica classica tra la fine del Seicento e l'inizio del Settecento. Tra queste diverse componenti vi erano anche la scienza araba e latina medievale dei pesi (*scientia de ponderibus*). Nella mente dei contemporanei, l'approccio di tale scienza all'equilibrio poteva competere con quello di Archimede nella spiegazione del

comportamento della bilancia. Uno degli argomenti fondamentali della meccanica preclassica era infatti la conoscenza della bilancia e la spiegazione del suo funzionamento grazie alla legge della leva, riconducibile ad Archimede. Secondo la legge della leva, una bilancia con bracci disuguali è in equilibrio quando i bracci delle leve sono inversamente proporzionali ai pesi ad essi applicati. Ma perfino un elemento così fondamentale della conoscenza meccanica come l'equilibrio della bilancia era in certa misura controverso ed evidenziava l'eterogeneità dei fondamenti concettuali della meccanica preclassica.

Intorno alla metà del Cinquecento, tale eterogeneità concettuale scatenò una controversia sull'equilibrio della bilancia e sulla corretta spiegazione del funzionamento di una bilancia con bracci disuguali. La domanda fondamentale era apparentemente elementare: come si comporta una bilancia con bracci uguali e pesi uguali applicati ad essi quando viene spostata dalla sua normale posizione orizzontale in posizione obliqua in seguito a un intervento esterno? Cessato l'intervento, ritorna automaticamente alla posizione di partenza, rimane in posizione obliqua, o assume una posizione verticale? L'approccio basato sulla scienza dei pesi araba e latina medievale suggeriva, in linea con l'esperienza quotidiana, che la bilancia sarebbe tornata in posizione orizzontale. Questa tesi fu adottata e difesa da Niccolò Tartaglia e Girolamo Cardano, due matematici di straordinaria cultura e pionieri della meccanica preclassica. Guidobaldo del Monte, autore del più influente trattato di meccanica di epoca rinascimentale nonché patrocinatore di Galileo, sosteneva invece che la bilancia sarebbe rimasta in posizione obliqua<sup>3</sup>, fondando la sua tesi sul concetto archimedeo di "centro di gravità". Giovanni Battista Benedetti, altro eminente ingegnere-scienziato ed esperto di meccanica, riteneva che - in considerazione della forma sferica della Terra - la bilancia si sarebbe spostata in posizione verticale. Chi aveva ragione e come si poteva dirimere la questione? Gli esperimenti compiuti con le bilance diedero risultati ambigui. Le normali bilance sembravano confermare la tesi medievale del ritorno alla posizione orizzontale. In effetti, una bilancia di somma precisione, appositamente fabbricata nel laboratorio di Guidobaldo

per smentire questa ipotesi e visibile nella casa del famoso intellettuale veneziano Vincenzo Pinelli, sembrò effettivamente confermare la tesi di Archimede che la bilancia sarebbe rimasta in posizione obliqua. D'altro canto, questo esperimento non si dimostrò sufficiente per dirimere la controversia. Infatti, la tendenza della bilancia a spostarsi in posizione verticale, ipotizzata da Benedetti in virtù della curvatura della Terra, era in ogni caso di scala troppo ridotta per essere verificata con un simile strumento. La battaglia decisiva della controversia sull'equilibrio di fine XVI secolo non si combatté sulla base di esperimenti così vaghi, ma piuttosto di considerazioni teoriche relative ad ulteriori strumenti meccanici, come il pendolo e il piano inclinato, e grazie all'elaborazione di concetti alternativi. Processo critico determinante per l'ulteriore sviluppo intellettuale della prima scienza moderna fu senza dubbio l'esplorazione dei limiti della meccanica preclassica, la quale produsse ambiguità e contraddizioni analoghe a quelle constatate nella controversia sull'equilibrio. Non si trattò affatto di un semplice esercizio teorico, bensì di un processo che incorporava molte delle esperienze pratiche acquisite attraverso l'utilizzo e la riflessione sulle sfide teoriche degli oggetti della tecnologia contemporanea, anche quando tali esperienze non assumevano necessariamente la forma di esperimenti quantitativi nel senso della scienza moderna. Le varie posizioni assunte riguardo alla controversia sull'equilibrio prendevano come punto di partenza interpretazioni diverse di esperienze pratiche elementari con pesi e bilance e, in particolare, bilance con bracci disuguali. Da un punto di vista archimedeo, una bilancia di questo tipo è in equilibrio quando il centro di gravità dei pesi applicati coincide con il fulcro a cui la bilancia è appesa.

Ciò che accade nel caso di una bilancia con bracci uguali e pesi uguali è evidente. Se poi i pesi possono essere suddivisi e ricollocati in modo da essere distribuiti a distanze diverse dal fulcro senza modificare la posizione del centro di gravità, allora l'equilibrio della bilancia viene mantenuto. In un'ingegnosa e dibattuta prova del suo trattato *Sull'equilibrio dei piani*<sup>5</sup>, Archimede riuscì a dimostrare che questo avviene quando i pesi sono inversamente proporzionali alla distanza a cui sono appesi. Le operazioni elementari cui questa dimostrazione della legge della leva fa riferimento sono quindi sostituzioni dei pesi su una bilancia che mantiene la posizione del centro di gravità.

Secondo la prospettiva della scienza medievale dei pesi, che attinse dal lavoro compiuto da Thabit ibn Qurra nella Baghdad del IX secolo, ripreso nel XIII secolo dallo studioso latino Giordano Nemorario, il problema va posto in termini differenti. Qui l'osservazione elementare è che un peso cambia di efficacia a seconda della posizione sulla bilancia. Un peso collocato a una distanza superiore dal fulcro avrà un effetto maggiore dello stesso peso collocato a una distanza inferiore. Una bilancia è in equilibrio quando i pesi ai due lati hanno la stessa "gravità posizionale" (*gravitas secundum situm*). Si noti che questi non devono essere della stessa grandezza assoluta. Com'è risaputo, un peso minore può controbilanciare un peso maggiore se sfrutta il braccio più lungo della leva. Nel linguaggio della scienza medievale dei pesi, la sua gravità posizionale è allora uguale a quella del peso maggiore collocato sul braccio più corto della leva. Il concetto di gravità posizionale riveste quindi un ruolo diverso ma analogo a quello del concetto di centro di gravità in ambito archimedeo. Le operazioni elementari a cui la scienza medievale dei pesi si riferisce sono movimenti dei pesi su una bilancia che ne incrementano o riducono la gravità posizionale.

Come si lascia riassumere la controversia sull'equilibrio in relazione alla contrapposizione di queste due prospettive? Dal punto di vista archimedeo, semplicemente non c'è motivo per cui una bilancia in equilibrio che venga spostata dalla posizione orizzontale a quella obliqua abbandoni tale posizione. Sia in posizione orizzontale che obliqua, il centro di gravità coincide con il fulcro; in termini moderni, la bilancia si trova in equilibrio indifferente. Dal punto di vista della scienza medievale dei pesi, invece, la questione è molto più complicata, in quanto si assume che i pesi applicati alla bilancia hanno modificato la loro efficacia posizionale a causa della nuova posizione obliqua in cui la bilancia è stata portata. Ci si chiederà allora se l'hanno modificata nello stesso modo a entrambi i lati della bilancia. In posizione obliqua, la bilancia è paragonabile a una leva inclinata perché le forze esercitate dai pesi sui suoi bracci non agiscono più perpendicolarmente ai bracci stessi ma con un'angolazione.

Poiché era risaputo che un peso che agisce secondo un angolo diverso da un angolo retto non esercita la stessa forza di un peso che agisce perpendicolarmente, la questione rimaneva aperta.

Elemento cruciale per la risposta era il modo in cui si misurava l'efficacia derivante dalla posizione; in termini moderni, era questione di come stabilire il momento di un peso. A Giordano e ai suoi seguaci sembrava che il peso spostato verso l'alto per portare la bilancia in posizione obliqua acquisisse un'efficacia posizionale maggiore del peso spostato verso il basso. Conclusero, di conseguenza, che la bilancia tendeva a ristabilire il proprio equilibrio tornando in posizione orizzontale. Benedetti - avveduto prosecutore di questa tradizione - riteneva invece che la stessa tesi, riconsiderata in un contesto cosmologico in cui era rilevante la forma sferica della Terra, implicasse in realtà che il peso inferiore assumesse la maggior efficacia posizionale, per cui la bilancia avrebbe teso ad allinearsi verticalmente.

Le risposte moderne a queste domande dipendono da un sofisticato sistema concettuale e tecnico. Come si scoprì in seguito, sebbene l'analisi archimedeo di Guidobaldo fosse corretta da una prospettiva che facesse astrazione della forma del globo terrestre, Benedetti descrisse correttamente le conseguenze di una trattazione che ne tenesse invece conto. La concezione della fisica classica sarebbe emersa gradualmente dalla meccanica preclassica passando attraverso momenti critici come la controversia sull'equilibrio.

Negli sviluppi storici della disciplina, fondamentale fu l'identificazione di una misura della gravità posizionale la cui applicazione alla bilancia determina, almeno in ambiente terrestre, lo stesso risultato dell'applicazione del concetto di centro di gravità. L'esigenza di determinare tale misura fu posta per la prima volta da Benedetti e osteggiata con violenza da Guidobaldo, come sappiamo dai suoi manoscritti e dai commenti a margine che quest'ultimo lasciò su una copia del testo di Benedetti.

Tuttavia, come possiamo desumere da fonti manoscritte, fu Galileo che, discutendo il lavoro di Benedetti con Guidobaldo, dimostrò la compatibilità della misurazione di Benedetti dell'effetto posizionale di un peso con l'approccio di Guidobaldo alla bilancia basato sul concetto archimedeo di centro di gravità. Nello stesso contesto, Galileo confutò l'erronea analisi del piano inclinato effettuata da Guidobaldo, sostituendola con la sua famosa dimostrazione basata sulla misura dell'effetto posizionale del peso di Benedetti.

Grazie a Galileo, la misura dell'effetto posizionale di un peso proposta da Benedetti divenne un concetto centrale della nuova meccanica e della teoria del movimento. Questi, seguendo una lunga e autorevole tradizione che risale ad Archimede stesso, lo designò come "momento" (ροπή)<sup>8</sup>, utilizzandolo per descrivere i diversi effetti della posizione del peso in diversi sistemi meccanici e, al contempo, l'effetto variabile di un peso in movimento. Questo gli offrì uno strumento per affrontare un problema saliente della sua prima teoria del movimento, che consisteva nel conflitto tra la teoria aristotelica del movimento - che aleggia ancora in sottofondo nelle sue concezioni - e le implicazioni della legge della caduta dei gravi scoperta nel 1592. Come si può spiegare l'aumento uniforme di velocità nel moto accelerato di un corpo in caduta quando il peso del corpo, causa di questo movimento, rimane costante?

Secondo Aristotele, una causa costante deve avere un effetto costante, vale a dire, in questo caso, una velocità costante, mentre in realtà la velocità del moto di caduta aumenta in maniera costante.

Il concetto di "momento" sembrava ora offrire a Galileo la possibilità di spiegare il fatto che, durante un movimento, l'effetto di un peso può variare, proprio come accade quando è collocato in diversi sistemi meccanici. Egli parlò, per esempio, del "momento" acquistato da un corpo dopo un certo tempo di caduta. Considerata la concezione aristotelica nell'ambito della quale l'intero problema veniva affrontato, la soluzione di Galileo, incentrata sul concetto di velocità e sulle sue cause, non poteva essere duratura.

Ciò nonostante, costituiva un'importante fase di transizione verso la meccanica classica.

Quale lezione si può trarre da questa intricata storia dell'appropriazione del lavoro di Archimede da parte dei protagonisti della meccanica rinascimentale? La ricostruzione storica della scienza dell'antichità classica all'epoca della meccanica preclassica fu fortemente influenzata dall'emergere della nuova figura degli scienziati-ingegneri, che avevano bisogno di legittimare la propria cultura

ibrida, fatta di pratica e teoria. Tale situazione determinò un risultato disomogeneo. Alcuni protagonisti, come Guidobaldo, elogiavano soltanto Archimede e consideravano i contributi medievali alla meccanica superflui e fonte di confusione. Alla corte di Urbino, di cui lo studioso faceva parte, si riteneva che la nuova meccanica dovesse essere una restaurazione di quella antica, il più possibile fedele e pura. Ironicamente, l'ostinata convinzione che Archimede e Aristotele condividessero posizioni simili sulla meccanica faceva parte di questa visione sincretistica dell'antichità. Altri, come Tartaglia o Benedetti, avevano una mentalità più aperta e pragmatica. Ciò che più contava a Venezia e a Torino, dove essi furono attivi, erano le conquiste pratiche della meccanica. Qui la ricerca sulla nuova meccanica era strettamente correlata alla critica degli antichi, in particolare di Aristotele. Tuttavia, molti assunti fondamentali della filosofia naturale aristotelica rimasero incontestati, perfino nell'opera di Galileo.

In conclusione, la controversia sull'equilibrio fu anche una controversia sull'antichità e sul suo *status* di cultura di riferimento. Le posizioni assunte in questo dibattito plasmarono anche il modo di affrontare le problematiche attuali, tanto quanto esse stesse ne furono plasmate, e non solo in merito alla questione se la bilancia tornasse al punto di partenza o meno. Per quanto riguarda l'eredità della scienza antica e del lavoro di Archimede, potremmo benissimo trovarci in una situazione analoga. Essa rappresenta tuttora un importante riferimento culturale per la scienza odierna. Ma quale giudizio del nostro passato scientifico può aiutarci ad affrontare le sfide attuali? In che modo dobbiamo ricostruire il passato per costruire il futuro? In questo senso più ampio, la controversia sull'equilibrio potrebbe non essere del tutto conclusa.

*Jürgen Renn*  
*Direttore del Max Planck Institute for the History of Science di Berlino*