

Eleonora Aquilini, Antonio Testoni e Roberto Zingales

Divisione di Didattica della SCI

✉ ele.aquilini6@gmail.com; ajteston@tin.it; robertozingales@outlook.it

Alla scoperta della natura dell'aria

Prima parte: la materialità dell'aria e l'esistenza del vuoto

RIASSUNTO

I problemi della materialità dell'aria e della natura discreta della materia sono legati storicamente al problema dell'esistenza del vuoto. Con Torricelli si comprende che l'aria ha un peso, è materia, esercita una pressione e che il vuoto è compatibile con la materia. Boyle dimostra che l'aria è un fluido elastico e ne interpreta il comportamento ricorrendo ad un modello cinetico-particellare. Entrambi i contributi furono fondamentali per la costruzione del concetto di gas e del modello "microscopico" della materia.

ABSTRACT

The problems of the materiality of air and the discrete nature of matter are historically linked to the problem of the existence of vacuum. Torricelli demonstrated that air has a weight, it is matter, it exerts a pressure, and that vacuum is compatible with matter. Boyle demonstrated that air is an elastic fluid and interpreted its behavior using a kinetic-particle model. Both contributions were fundamental for the construction of the concept of gas and the "microscopic" model of matter.

Introduzione

La prospettiva storico-epistemologica che permette di comprendere come certi concetti sono nati e si sono sviluppati è fondamentale nell'insegnamento; lo dimostra il caso emblematico che riguarda la natura dell'aria a cui è dedicato il presente contributo, a cui ne seguirà un secondo nel prossimo numero della rivista. Entrambi questi contributi offrono una serie di "spunti didattici" per affrontare nella scuola secondaria di secondo grado in modo significativo e nell'ottica storico-epistemologica questo tema, che non è affatto banale da far comprendere agli studenti.

Il riconoscimento dell'esistenza delle sostanze aeriformi è stato ostacolato da difficoltà concettuali, pri-

ma ancora che sperimentali, perché, a differenza di quelle solide e liquide, che possono essere individuate ed esaminate attraverso i sensi (soprattutto vista e tatto), sfuggono all'analisi sensoriale. Boyle (1627 – 1691) affermava che, non potendole vedere, la maggior parte degli uomini di scienza tendeva a ignorarle, perché ciò che non si vede è prossimo al nulla [1]. Eppure, non è verosimile che per millenni l'uomo non si sia accorto dell'involucro invisibile che lo circonda, riconoscendolo indispensabile per la propria sopravvivenza, percependone i movimenti (vento) e sfruttandoli a proprio vantaggio, notandone il manifestarsi sotto forma di bolle, che si liberano da paludi o acque putride stagnanti, o per effervescenza generata versando l'aceto sul calcare (già nota agli Assiri), o durante la fermentazione alcoolica, o il riscaldamento dell'acqua al fuoco. Molti filosofi dell'antichità classica (Anassimene, Empedocle, Platone, Aristotele) attribuirono concretezza all'aria, considerandola uno dei costituenti delle sostanze materiali.

Quando l'osservazione del mondo naturale si fece più attenta e sistematica, si notò che, per riscaldamento di liquidi e solidi si sprigionavano vapori. Gli alchimisti, che sottoponevano i materiali all'azione violenta del fuoco, per ucciderli prima di rigenerarli, notarono che dal corpo morto si allontanava uno spirito, come lo spirito di vino (alcool etilico), lo spirito di vetriolo (anidride solforica), lo spirito muriatico (acido cloridrico), le prime sostanze volatili identificate.

I minatori sapevano che nelle gallerie delle miniere si sprigionano esalazioni nocive, che attribuivano ai coboldi, folletti che difendevano in questo modo il proprio territorio dall'intrusione umana.

Si può, dunque, affermare che, all'inizio del '600, l'esistenza dell'aria e degli aeriformi era un fatto accettato, anche se non ne era chiara la natura: in generale, l'aria era ritenuta l'ambiente indispensabile per la sopravvivenza di uomini e animali, per fare avvenire la combustione ed era vista come un ricettacolo nel

quale potevano dissolversi vapori e miasmi, contaminandola in maniera più o meno evidente.

Più incerta restava la consapevolezza della sua materialità, resa problematica dalla sua inconsistenza. Aristotele, riconosceva un peso all'aria, perché una vescica piena d'aria pesava più di quando era vuota. Attribuiva ai quattro elementi pesi diversi: la terra era pesante in assoluto, l'acqua relativamente pesante, l'aria relativamente leggera, il fuoco assolutamente leggero [2]; essi costituivano quattro sfere concentriche, disposte secondo il peso crescente, senza interruzioni, in modo da escludere il vuoto. Al di là della sfera più esterna, quella del fuoco, c'era l'etere, o quintessenza [3]. I suoi commentatori medievali avevano distinto gli elementi pesanti (terra ed acqua) da quelli leggeri (aria e fuoco), privi di peso, perché attratti dalla propria sfera, al di sopra della terra.

Con l'adozione del metodo scientifico, i filosofi rinunciarono a scoprire la natura intrinseca degli oggetti materiali e le loro forme sostanziali, rivolgendo la propria attenzione a problemi che potevano essere risolti attraverso la sperimentazione, indagando i fenomeni naturali e le loro correlazioni e, soprattutto, dedicandosi a quelle caratteristiche del mondo fisico che potevano essere pesate e misurate, e quindi espresse in termini matematici [4].

Tra il XVII e il XVIII secolo iniziò e si completò il percorso speculativo e sperimentale che avrebbe portato a riconoscere anche gli aeriformi come sostanze materiali, a distinguerli tra di loro e a individuarne le proprietà fisiche e chimiche. Questo percorso fu certamente agevolato sia da una diversa impostazione dell'indagine dei fenomeni naturali e da una maggiore accuratezza nella sperimentazione, sia dall'utilizzo sistematico della strumentazione, vecchia (bilancia) e nuova (barometro, bagno pneumatico, pompa da vuoto, eudiometro).

All'inizio del '600 il medico fiammingo Jean Baptiste van Helmont (1577 – 1644) riteneva che l'aria non fosse un componente delle sostanze, ma che vi si trovasse temporaneamente imprigionata; si impegnò, perciò, a liberarla, analizzandola, esclusivamente in base ai propri sensi, riconoscendone colore, odore e sapore. Notò delle differenze e, perciò, avanzò l'ipotesi che non si trattasse di aria, ma di qualcosa che, pur avendo lo stesso aspetto fisico, fosse sostanzialmente diverso, caso per caso. Negò a questi aeriformi qualsiasi consistenza materiale, ritenendoli una sorta di pre-materia, simile a quella che, verosimilmente, esisteva nel caos primordiale: li chiamò gas, forse come storpiatura dell'originale termine greco [5]. In particolare, si accorse che, in processi molto diversi, come la combustione del carbone, l'azione degli acidi sugli alcali, la fermentazione dei succhi vegetali, si

produceva sempre lo stesso gas, che chiamò gas silvestre (in latino, selvaggio), perché non era riuscito a imprigionarlo in un recipiente.

Intorno al 1630, il medico parigino Jean Rey (1583 – 1645) si accorse che il violento riscaldamento al fuoco di alcuni metalli, come piombo e stagno, non solo li trasformava in una polvere bianca chiamata calce (ossido), ma ne determinava un aumento in peso. Formulò l'ipotesi che l'aria, dotata di peso come tutte le sostanze materiali, si fosse appiccicata ai metalli durante il riscaldamento. Rey non dette seguito a questi esperimenti e a queste ipotesi.

La prima parte del percorso qui descritto è focalizzata sui contributi di Torricelli (1608 – 1647) e Pascal (1623 – 1662), in quanto riteniamo che siano fondamentali per introdurre nuove concezioni come la materialità dell'aria e l'esistenza del vuoto, che rappresentano ostacoli epistemologici e concettuali rilevanti. In particolare, il problema del peso dell'aria s'intreccia al problema dell'esistenza del vuoto.

Torricelli ebbe una grandissima intuizione nel ritenere che l'aria potesse essere “pesata” utilizzando un tubo di vetro chiuso ad un'estremità contenente mercurio e rovesciato in una bacinella. Con Torricelli il concetto di pressione appare come un concetto intuitivo che con Pascal acquista una più chiara definizione [6]. L'esperienza di Torricelli assume un grande ruolo didattico quando si recepisce la differenza, il salto che ci può essere fra l'esperimento e il suo significato. Con l'esperienza di Boyle s'introduce un altro fattore importante per la comprensione del comportamento dei gas, l'elasticità dell'aria. L'aria è un fluido elastico, può essere compresso/espanso ed esiste una relazione di inversa proporzionalità fra pressione e volume, a temperatura costante. Da un lato, questa è un'occasione importante per cogliere la regolarità di certi comportamenti e la conseguente introduzione di una legge che è espressione matematica di un fenomeno fisico [7], dall'altro, l'interpretazione di questi fenomeni rilancia l'ipotesi cinetico-particellare sulla costituzione dell'aria e più in generale della materia. Si tratta allora di ricostruire il contesto storico epistemologico in cui si è posto il problema della materialità dell'aria. In questo modo si concretizzano, in relazione al peso dell'aria, concetti come il peso specifico, la pressione e il volume [8].

1 Le ipotesi e gli esperimenti di Torricelli

Per millenni, fino alla prima metà del Seicento, fenomeni come l'aspirazione di un liquido con una siringa o con una cannuccia, il mancato svuotamento di una colonna d'acqua immersa in una ba-

Un po' di storia dentro la storia

Intorno al 1630, il fisico Giovanni Battista Baliani (1582 – 1666), lavorando all'ampliamento dell'acquedotto di Genova, dovette far superare alla condotta una collina alta circa 20 metri. Utilizzò un sifone pieno d'acqua, ma, dopo averlo posto in opera, si accorse che, in entrambi i rami del sifone, l'acqua era defluita parzialmente, fino ad arrestarsi all'altezza di 10 metri. Chiese il parere di Galilei, che affermò che le colonne d'acqua più alte di 10 metri si frantumavano sotto il loro stesso peso, per eccesso di carico. Baliani, invece, e Isaac Beeckman (1588 – 1637) con lui, riteneva che fosse il peso dell'aria all'esterno a sollevare l'acqua lungo condotte chiuse fino all'altezza di 10 metri, quando si raggiungeva un bilanciamento.

Nel tentativo di far chiarezza sulla questione e con l'intento dichiarato di convincere Galileo [9], intorno al 1641 il giovane matematico e astronomo mantovano Gasparo Berti (1600 – 1644) realizzò a Roma un esperimento, alla presenza dei gesuiti Atanasio Kircher (1602 – 1680) e Niccolò Zucchi (1586 – 1670), e di Raffaele Magiotti (1597 – 1658). Dell'esperimento furono scritti quattro resoconti: quelli di Kircher e Zucchi sono in parte contraddittori e forse condizionati dai loro pregiudizi contro l'esistenza del vuoto. Quello di Magiotti fu scritto parecchi anni dopo. Il più circostanziato risulta quello di Emmanuel Maignon, noto come Magnanus (1601 – 1676), basato su una dettagliata descrizione da parte dello stesso Berti e pubblicato a Tolosa nel 1653, alla luce degli esperimenti e delle riflessioni successive. Berti attaccò verticalmente a una parete

un tubo di piombo lungo 40 palmi, chiuso da un rubinetto all'estremità inferiore, che era immersa in un barile pieno d'acqua; all'estremità superiore del tubo era fissato un fiasco di vetro capovolto, con al fondo un'apertura chiusa da un tappo. Riempiti d'acqua il tubo e il fiasco, e tappato quest'ultimo, Berti aprì il rubinetto lasciando defluire l'acqua dal fiasco, lungo il tubo, entro il barile. L'acqua, però, non defluisce completamente, fermandosi ad un livello di circa 18 cubiti (10 metri), che si mantenne fino al giorno successivo. Tolto il tappo dal fiasco, l'aria vi entrò con il caratteristico sibilo e l'acqua defluisce completamente nel barile. L'esperimento di Berti poneva due quesiti fondamentali: 1) cosa impedisse all'acqua di defluire completamente; 2) cosa rimanesse nella porzione del fiasco e del tubo al posto dell'acqua. L'ipotesi che fosse il peso dell'aria atmosferica a sostenere la colonna d'acqua contrastava con la concezione comune che l'aria fosse un fluido leggerissimo e con la difficoltà di determinare questo peso, che sembrava enorme, mentre l'ipotesi che il fiasco rimanesse vuoto contrastava con il senso comune e con l'autorevole negazione della sua esistenza da parte di Aristotele. Ovviamente, i filosofi naturali più attenti erano in grado di superare queste difficoltà e, quindi, si innescò un ampio e prolungato dibattito scientifico sul peso dell'aria e sull'esistenza del vuoto, che diedero vita a numerosi esperimenti ben congegnati e realizzati, anche se non sempre correttamente interpretati. Maignon era convinto che l'acqua fosse sostenuta entro il tubo dalla forza dell'aria circostante che bilanciava il peso

dell'acqua. Magiotti descrisse l'esperimento a Torricelli, suggerendo che, se si fosse usata acqua di mare, questa si sarebbe fermata nel tubo a un livello più basso. La possibilità che liquidi di diversa densità avessero un comportamento diverso fu presa in considerazione da Vincenzo Viviani (1622 – 1703), che, nella pagina dei Discorsi di Galilei, nella quale si spiega che una colonna d'acqua alta più di 10 metri si spezza sotto il proprio peso, come una fune cui è attaccato un carico eccessivo, annotò di suo pugno (probabilmente con il consenso dello stesso Galileo) che con altri liquidi, come mercurio, vino, olio, ecc., la rottura della colonna sarebbe avvenuta a un'altezza minore o maggiore delle 18 braccia, a seconda del loro maggiore o minore peso specifico, rispetto a quello dell'acqua [10].

Anche Torricelli era convinto che fosse il peso che l'aria esercitava sulla superficie dell'acqua a sollevarla entro il tubo, ma solo finché il peso della colonna d'acqua era minore di quello dell'aria. Accogliendo il suggerimento di Magiotti, progettò di ripetere con differenti liquidi l'esperimento di Berti, immaginandone i risultati nei dettagli: ne parlò a Viviani, che, disponendo dell'attrezzatura, lo realizzò materialmente. Riempì il tubo prima con acquerzente (una soluzione concentrata di alcool etilico) e poi con argento vivo (mercurio). I risultati confermarono le previsioni di Torricelli: il mercurio, avendo una densità 13,6 volte maggiore di quella dell'acqua, richiedeva tubi molto più corti, rendendo l'attrezzatura molto più maneggevole per i futuri esperimenti.

cinella d'acqua vennero spiegati dalla maggioranza degli scienziati e dei filosofi con la "paura del vuoto", che nella teoria fisica di Aristotele rappresentava un concetto centrale. Si pensava, cioè, che il vuoto non potesse esistere e, conseguentemente, si supponeva che la natura si opponesse (oppone resistenza) contro i tentativi effettuati per crearlo: all'apparenza, i fenomeni sopra descritti sembravano causati da questa opposizione. La nascita della scienza moderna si realizzò nel Seicento in contrapposizione radicale alla fisica aristotelica, che aveva continuato ad essere considerata anche nei secoli precedenti un dogma indiscutibile ed in sintonia con la riscoperta, dopo secoli di oblio delle antiche **concezioni atomistiche** di Democrito, Epicuro e Lucrezio, che invece avevano considera-

to l'**esistenza del vuoto** un'ipotesi scientifica fondamentale.

Indubbiamente anche le scoperte di Evangelista Torricelli, un discepolo di Galileo, furono influenzate da questo clima intellettuale profondamente rinnovato. Comunque, gli scienziati del XVII secolo, fino a Cartesio, continuarono a credere nell'opposizione della natura alla formazione del vuoto. Anche Galileo, che, ad esempio, era a conoscenza dell'impossibilità di sollevare mediante le comuni pompe aspiranti una colonna d'acqua al di sopra di circa 10 metri a partire dal pelo libero dell'acqua di un pozzo o di un bacino, non riuscì a trovare una spiegazione soddisfacente di questi fenomeni.

Nel 1644 Torricelli effettuò degli esperimenti con dei tubi di diversa forma e lunghezza, chiusi ad un'estre-

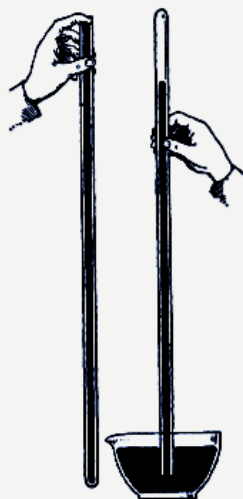


Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3

mità, constatando che, in tutti i tubi, il mercurio discendeva fino alla stessa altezza (Figure 1, 2 e 3).

Il dislivello esistente tra il mercurio contenuto nei tubi e quello della bacinella era sempre di circa 76 cm (nei tubi torricelliani si realizzano spazi vuoti tanto più grandi quanto più alti sono i tubi; in realtà, per la proprietà del mercurio di evaporare, come tutti i liquidi, fornendo una piccola quantità di vapori, si crea una situazione di quasi vuoto, che prende appunto il nome di *vuoto torricelliano*).

Per Torricelli, questi esperimenti confutavano innanzitutto la concezione aristotelica della paura del vuoto: infatti se la causa del dislivello fosse stata la paura del vuoto, i dislivelli di mercurio in tubi di diversa forma e volume avrebbero dovuto essere diversi. Demolita in questo modo l'antica concezione, si sentì sufficientemente sicuro per riaffermare la sua ipotesi: se la causa del dislivello del mercurio non poteva più essere ricercata all'interno del tubo (la paura del vuoto), essa poteva essere attribuita a qualcosa di esterno, al peso dell'aria. È l'aria che "spinge" e non il vuoto che risucchia. Questa ipotesi va molto oltre l'apparenza fenomenica. Normalmente non ci si rende conto che l'aria ha un peso. In realtà questa grande scoperta non è ricavabile banalmente dagli esperimenti precedenti.

Se poniamo i ragazzi di fronte a questo fenomeno, la spiegazione che viene ritenuta più convincente da parte loro, in una situazione di primo approccio a tale fenomenologia, è riconducibile alla teoria dell'horror vacui. La spiegazione di Torricelli risulta, di primo acchito, inverosimile e incomprensibile. Come può l'aria avere un peso che preme sulla superficie libera del mercurio tale da sostenere una colonna di mercurio alta circa 760 mm, dato che non avvertiamo alcun senso di oppressione da parte dell'aria?

Questa è la domanda che viene fatta più di frequente dai ragazzi quando si presenta l'idea di Torricelli. E se si chiede loro che cosa ci si dovrebbe aspettare se la stessa esperienza venisse effettuata con tubi di diversa lunghezza, di solito, non hanno dubbi: nei tubi più lunghi il dislivello del mercurio sarà maggiore perché il vuoto è superiore.

Torricelli non si limitò all'aspetto qualitativo, ma formulò un'ipotesi quantitativa, cioè, che il peso della colonna di mercurio alta 76 cm fosse controbilanciato dal (fosse equivalente al) peso dell'aria atmosferica che premeva sul mercurio contenuto nella bacinella.

Torricelli, comunque, non si riferiva al peso assoluto dell'aria atmosferica, ma a quello che gravava su una determinata superficie del mercurio, esattamente equivalente a quella su cui premeva il mercurio contenuto nel tubo di vetro. In sostanza l'aria si comportava come un liquido dal peso specifico estremamente basso e obbediva alle stesse leggi dei liquidi.

2 Le conferme di Pascal

L'ipotesi di Torricelli risultò così ben poco evidente che, nonostante le significative conferme sperimentali ricevute negli anni immediatamente successivi, passò molto tempo prima che essa venisse accettata dalla comunità scientifica.

Le prime importanti conferme sperimentali furono fornite dallo scienziato e filosofo francese Blaise Pascal. Oltre che mercurio utilizzò anche acqua e vino (più "leggero" dell'acqua), verificò che l'altezza della colonna d'acqua corrispondeva a quanto previsto dall'ipotesi di Torricelli ($p_s \text{ mercurio} = 13,6 \text{ g/cm}^3$; $p_s \text{ acqua} = 1 \text{ g/cm}^3$; $[13,6 \text{ g/cm}^3 : 1 \text{ g/cm}^3] \times 76 \text{ cm} =$

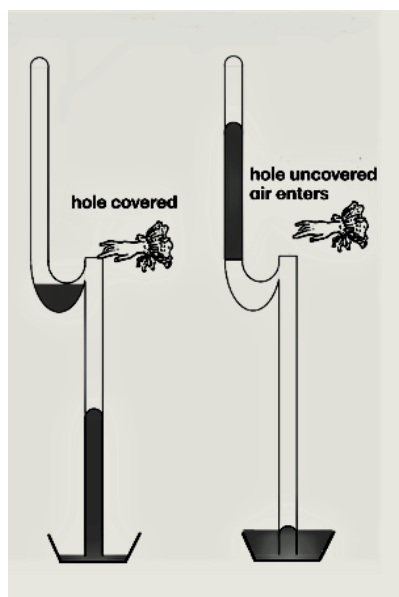


Fig. 4 Esperimento di Pascal.

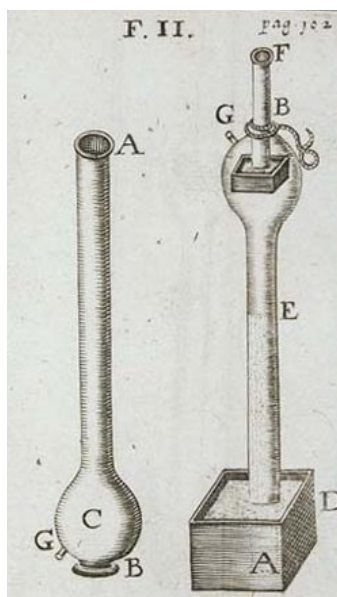


Fig. 5 Esperimento di Auzout.

1033,6 cm) e che la colonna di vino era più alta di quella d'acqua.

Pascal per provare, al di là di ogni dubbio, che è *la pesantezza dell'aria a produrre tutti gli effetti che si osservano per i fluidi che restano sollevati* realizzò anche un altro esperimento, noto come *l'esperimento del vuoto nel vuoto* (1648), ideato da Adrien Auzout (1622 – 1691) e descritto da Pascal nel suo trattato postumo *La pesanteur de la masse de l'air* (Figure 4 e 5):

“Si prenda un tubo con la parte inferiore curva, chiuso nel punto A ed aperto in B ed un altro tubo diritto aperto nei punti M e N, ma inserito e saldato nel punto M all'estremità ricurva dell'altro come si vede in figura (Figura 4). Si chiuda B con un dito ... e si rovesci completamente tutto il tubo ... lo si riempia di mercurio e si rimetta il punto A in alto e quello N in una vaschetta piena di mercurio. Vedremo che il mercurio contenuto nel tubo superiore precipiterà completamente e verrà raccolto nell'interno della curvatura, mentre il mercurio del tubo inferiore rimarrà sollevato fino ad un livello di 26 o 27 pollici... La ragione di questa differenza è data dal fatto che l'aria, esercitando una pressione sul mercurio della bacinella in cui pesca l'estremità inferiore del tubo, mantiene sollevato il mercurio. Non esercitando alcuna pressione, invece, sopra il mercurio che si trova nell'estremità ricurva della curva del tubo superiore... non venendosi a trovare affatto aria ... vediamo il mercurio cadere... Togliendo il dito dall'apertura si vedrà che il mercurio contenuto nella parte curva salirà di colpo fino a raggiungere i 26 o 27 pollici... Poi vediamo ... che quello contenuto nel tubo inferiore si abbassa completamente” [11].

Fu quest'esperienza a convincere molti scienziati ancora incerti ad aderire alla teoria torricelliana: solo

la spinta dell'aria può determinare questi esiti e non certo il risucchio del vuoto.

Anche la seconda importante conferma sperimentale dell'ipotesi di Torricelli fu fornita da Pascal. Nel 1648, Florin Périer (1605 – 1672), salendo sul Puy de Dôme, fu in grado di constatare, in conformità alle sue aspettative, che, partendo dal valore di 76 cm al livello del mare, il dislivello di mercurio continuava a diminuire, a mano a mano che si saliva.

3 Conclusioni della prima parte

La storia della scoperta della materialità dell'aria, del suo peso e del vuoto, che fin qui è stata tracciata, ha posto le basi per un itinerario didattico che proseguirà (seconda parte) con i concetti di pressione e di

elasticità dell'aria. Concetti che sono strettamente connessi con lo studio delle proprietà del vuoto e delle macchine per produrlo. Questo lavoro sfocerà poi, da un lato, nella caratterizzazione delle “arie” diverse da quella atmosferica (chimica pneumatica e Lavoisier) e, dall'altro, nell'atomismo daltoniano. Quando nasce il concetto di gas la chimica nasce come scienza ed è un aspetto da non trascurare in un insegnamento significativo che ponga la storia della scienza fra i suoi fondamenti.

Bibliografia

- [1] R. Boyle, *Works*, T. Birch ed., Londra 1744, v. 5, p. 178.
- [2] B. Russell, *Storia della Filosofia occidentale*, TEA, Milano 1991, p. 213.
- [3] I. Asimov, *Il Libro di Fisica*, Mondadori, Milano 1990, p. 225.
- [4] A. C. Crombie, *The History of Science, from Augustine to Galileo*, Dover Publications Inc., New York 1995, p. 131.
- [5] J. B. van Helmont, *Oriatrike*, Londra, 1663.
- [6] B. Pascal, *Trattato sull'equilibrio dei liquidi*, Boringhieri, Torino, 1968, p. 84.
- [7] C. Fiorentini, E. Aquilini, D. Colombi, A. Testoni, *Leggere il mondo oltre le apparenze*, Armando, Roma, 2007, pp. 96 - 125.
- [8] G. Cavallini, *La formazione dei concetti scientifici*, La Nuova Italia, Firenze, 1995, pp. 11 - 29.
- [9] W. E. Knowles Middleton, *The History of the Barometer*, Johns Hopkins, Baltimora, 1964, pp. 3-18.
- [10] W. E. Knowles Middleton, *The History of the Barometer*, Johns Hopkins, Baltimora, 1964, pp. 19-32.
- [11] B. Pascal, *Trattato sull'equilibrio dei liquidi*, Boringhieri, Torino, 1968, pp. 113 - 117.