



La materialità dell'aria da Torricelli a Boyle

The materiality of air from Torricelli to Boyle

ELEONORA AQUILINI

Summary

The problem of materiality of air is historically linked to the problem of the existence of vacuum. We understand with Torricelli that air has a weight and that it exerts a pressure. Thanks to Boyle's experiments we understand that air is an elastic fluid and that there is a precise ratio between air volume and its pressure.

Key words

Air, vacuum, pressure, volume.

Riassunto

Il problema della materialità dell'aria è legato storicamente al problema dell'esistenza del vuoto. Con Torricelli si comprende che l'aria ha un peso ed esercita una pressione. Grazie agli esperimenti di Boyle si comprende che l'aria è un fluido elastico e che c'è fra volume e pressione dell'aria un rapporto preciso.

Introduzione

È fondamentale una prospettiva storico-epistemologica nell'insegnamento che permetta di comprendere come certi concetti sono nati e si sono sviluppati. 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 [7]. L'esperimento con l'argento vivo ripetuto con vasi di forma diversa permette di dimostrare che l'*horror vacui* non è la causa del comportamento del mercurio. Infatti il mercurio non si comportava in modo tale da lasciare meno vuoto possibile. L'esperienza di Torricelli acquista 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 ed esiste una relazione di inversa proporzionalità fra pressione e volume, a temperatura costante. È un'occasione importante quest'ultima per cogliere la regolarità di certi comportamenti, l'introduzione di una legge che è espressione matematica di un fenomeno fisico [5].

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 [4].

Evangelista Torricelli e Galileo Galilei

Evangelista Torricelli nasce a Roma nel 1608 e studia a Faenza presso lo zio materno. Ritorna a Roma nel 1625 ed è allievo di Padre Benedetto Castelli, esperto di idraulica e titolare della cattedra di matematica dell'Università La Sapienza. Successivamente, dal 1633 al 1641 Torricelli è segretario di Monsignor Giovanni Ciompoli, prelado della Curia romana e anch'esso amico di Galileo. Ciompoli "letterato, poeta e filosofo dotato di un certo talento, e non privo di interessi in campo scientifico" [8], sembrava in un primo tempo essere candidato al cardinalato, grazie agli incarichi a lui offerti da Papa Urbano VIII, successivamente fu invece allontanato da Roma. Scrive Fabio Toscano: "I motivi per i quali Ciompoli ebbe a perdere i favori di papa Barberini non sono stati ancora definitivamente chiariti in sede storiografica. Di sicuro, non giovarono le determinanti manovre per far ottenere

l'approvazione ecclesiastica alla stampa del *Dialogo* galileiano; tuttavia, la causa precipua della sua caduta in disgrazia sembra piuttosto essere legata ai presunti contatti che Ciompoli tenne con una fazione di alti prelati capeggiati da Gaspare Borgia, ostili al papa e alle sue politiche. Sta di fatto che... nel 1632 Urbano VIII lo allontanò da Roma mandandolo ad amministrare remoti paesetti degli Appennini umbri e marchigiani... Ciompoli ebbe al suo fianco come segretario personale proprio Evangelista Torricelli" [8].

Nel 1641 Torricelli torna a Roma e mostra i suoi lavori sulla caduta dei gravi a Padre Benedetto Castelli che ne parla a Galilei, già rimasto colpito favorevolmente da sue precedenti dissertazioni. Fu così che il 27 Dicembre 1641, Galilei inviò a Torricelli una lettera di apprezzamento e di invito a recarsi ad Arcetri per collaborare con lui [8]. Torricelli arrivò ad Arcetri il 10 Ottobre 1641 ed è significativo ciò che Vincenzo Viviani, assistente di Galileo, scrive a questo proposito:

Tra quei che egli accolse, tralasciando di nominar molti giovani fiamminghi, tedeschi e d'altrove, professori di pittura o scultura e di altro nobile esercizio, o esperti nelle matematiche o in altro genere di scienza, farò solo particolare menzione di quegli che fu l'ultimo in tempo, e in qualità forse il primo, e che già discepolo del P.D. Benedetto Castelli, ormai fatto maestro, fu dal medesimo Padre inviato e raccomandato al Sig. Galileo, affinché questi gustasse d'aver appresso di sé un geometra eminentissimo, e quegli, allora in disgrazia di fortuna, godesse della compagnia e protezione d'un Galileo. Parlo del Sig. Evangelista Torricelli, giovane d'integerrimi costumi e di dolcissima conversazione, accolto in casa, accarezzato e provvisionato dal Sig. Galileo, con scambievolmente diletto di dottissime conferenze [8].

Nella notte fra l'8 e il 9 gennaio 1642, Galileo muore. Ferdinando II de' Medici, granduca di Toscana nomina Torricelli "Matematico del Granduca", assegnandogli la cattedra di matematiche dell'Università di Firenze. Così Torricelli diviene ufficialmente l'*erede di Galileo*.

Il problema delle pompe aspiranti, la forza del vuoto, il peso dell'aria

Torricelli viene ricordato soprattutto per aver ideato il barometro. La storia di questa invenzione geniale è da collocarsi al centro di un dibattito, iniziato molti secoli prima, sull'esistenza del vuoto. Aristotele

nel IV secolo a.C. riteneva il vuoto fisicamente impossibile poiché la sua teoria sul moto considerava la velocità dei corpi inversamente proporzionale alla resistenza offerta dal mezzo in cui il corpo si trova e, nel caso del vuoto, la velocità sarebbe infinita, pertanto il corpo avrebbe il dono dell'ubiquità [6]. Di parere contrario erano gli atomisti come Democrito ed Epicuro che ritenevano il mondo composto di particelle indivisibili, sempre in movimento, separate da spazi vuoti. La teoria aristotelica fu sostenuta anche dalla teologia cristiana che “intravide nell'atomismo una prospettiva eretica, giacché una dottrina che prevedesse la generazione e l'evolversi della materia attraverso la combinazione più o meno casuale di atomi immutabili appariva priva di un fine superiore, e tale da mettere in discussione la stessa esistenza di Dio [8]. Nel Medioevo la teoria dell'*horror vacui*, introdotta come rielaborazione delle concezioni aristoteliche, veniva utilizzata per spiegare fenomeni fisici quali il funzionamento dei sifoni e delle ventose. Vacuisti come Galileo, pur ritenendo che non fosse la paura del vuoto la causa di questi e di analoghi fenomeni naturali, dettero spiegazioni non riferibili al peso dell'aria.

Verso il 1630 una caratteristica accumulava tutti i vacuisti: essi ammettevano il peso «assoluto dell'aria», cioè il peso dell'aria posta fuori dall'aria. È un concetto che può sembrare molto strano ai moderni, ma per quei primi fisici, l'aria nell'aria non pesa, come l'acqua nell'acqua non pesa. *Ne sia concesso* — scrisse Nicolò Tartaglia — *niun corpo esser grave in sé medesimo [...] cioè che l'acqua nell'acqua, il vino nel vino, l'aere nel aere, non essere di alcuna gravità. [...]* Ora, negare che un corpo nel proprio luogo pesi, equivale a negare che in seno a una massa fluida si stabiliscano pressioni, dovute appunto a questo peso[6].

Questa difficoltà a concepire *il peso dell'aria nell'aria* porta lo stesso Galileo a sostituire *l'horror vacui* con *la forza del vacuo* nella spiegazione del fatto che i fontanieri di Firenze non riuscivano a sollevare l'acqua oltre 18 braccia (circa 10,5 metri). Galileo infatti riteneva che le particelle di acqua fossero tenute insieme dagli infiniti «vacuoli» interstiziali; la forza in grado di separarle doveva quindi uguagliare la resistenza del vuoto ed era uguale al peso di una colonna d'acqua di 10,5 metri [8].

La forza del vacuo rappresenta, in base a questi presupposti, la resistenza offerta dal vuoto prima di potersi produrre. Ed è questa la

spiegazione che Galileo dà a Giovan Battista Baliani, ingegnere genovese, che gli chiede come mai un sifone da lui costruito per portare l'acqua ad un dislivello di circa 20 metri non funzionava. Baliani replica con la lettera del 24 Ottobre del 1630, manifestando il dubbio che sul comportamento dei sifoni potesse non essere estraneo il peso dell'aria. Ed è in questa lettera che parla di *pelago d'aria* in cui siamo immersi: *lo stesso mi è avviso che ci avvenga a noi nell'aria, che siamo nel fondo della sua immensità, né sentiamo il suo peso, né la compressione che ci fa da ogni parte... ma se fossimo nel vacuo e sulla testa ci incombesse l'aria, noi ne sentiremmo il peso molto grande ma non infinito, e perciò determinato, e con forza a lui proporzionata si possa superare, e perciò causarsi il vacuo* [6].

La risposta di Baliani costituisce il primo accenno chiaro alla pressione atmosferica e quasi certamente Galileo a Arcetri ne parlò con Torricelli che usa analoghe immagini per descrivere, nella lettera che invia a Michelangelo Ricci nel 1644, la sua esperienza con l'argento vivo:

Noi siamo immersi al fondo di un pelago d'aria, la quale per esperienza indubitata si sa che pesa e tanto che questa grossissima vicina alla superficie terrena pesa circa una 400^{ma} parte del peso dell'acqua" [6].

Torricelli racconta quindi le modalità con cui è stata eseguita l'esperienza: un tubo di vetro lungo circa un metro, chiuso ad un'estremità, capovolto in una bacinella contenente mercurio; il mercurio discende solo in parte.

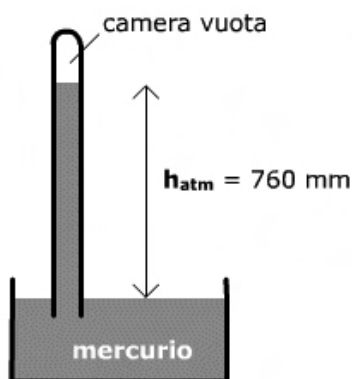


Figura 1.

L'esperienza viene eseguita per la prima volta da Viviani su incarico di Torricelli e fu poi ripetuta con tubi di forma diversa e lunghezza diversa, constatando che il dislivello era sempre lo stesso. In uno di questi esperimenti Torricelli, per dimostrare che lo spazio sovrastante il mercurio era vuoto, fece arrivare acqua che *con impeto orribile*, l'andava a riempire. Nella lettera a Baliani, Torricelli scrive:

Questa forza che regge quell'argento vivo contro la sua naturalezza a ricader giù, si è creduto fino adesso che sia stata interna nel vaso, o di vacuo, o di quella roba sommamente rarefatta; ma io pretendo che la sia esterna e che la forza venga di fuori. Su la superficie del liquore che è nella catinella gravita l'altezza di 50 miglia d'aria; però qual meraviglia è se nel vetro dove l'argento vivo non ha inclinazione, né anco ripugnanza per non esservi nulla, entri e s'innalzi fin tanto, che si equilibri con la gravità dell'aria esterna, che lo spinge?

Occorre ricordare che a Roma, tra il 1640 e il 1643, un altro scienziato galileiano, Gasparo Berti, aveva fatto esperimenti analoghi con l'acqua utilizzando un tubo di piombo alto 12 metri, chiuso in alto da una sfera di vetro e appoggiato su un catino contenente acqua. Riempendo completamente il tubo e aprendo un rubinetto, l'acqua defluiva nel catino fermandosi all'altezza di 10,5 metri. Per capire se sopra il pelo dell'acqua ci fosse o meno il vuoto, applicò nella parte dell'alta del tubo un campanello con il battaglio bloccato da un magnete. Lasciando andare il magnete il campanello iniziò a suonare, segno che dell'aria o qualche altra sostanza era rimasta all'interno. Questo fu interpretato come dimostrazione della veridicità della teoria dell'horror vacui, non considerando che, anche in presenza di vuoto un suono si sarebbe prodotto per le vibrazioni del campanello trasmesse al filo metallico che le sorreggeva [8]. È stato sottolineato che i precedenti esperimenti di Berti, peraltro non dirimenti la questione dell'esistenza del vuoto, non sminuiscono l'importanza dell'esperimento di Torricelli. L'utilizzo del mercurio costituisce "una cruciale differenza, legata alla congettura che fosse la pressione atmosferica a determinare l'altezza massima di un qualsiasi liquido; in questa ipotesi, infatti il mercurio quattordici volte più denso dell'acqua, avrebbe dovuto formare una colonna quattordici volte più bassa" [8], uno strumento agevole per studiare la pressione. Per illustrare la chiarezza d'idee di Torricelli riguardo ai vari aspetti dell'esperimento con il

mercurio è utile ricordare il carteggio intercorso successivamente con Michelangelo Ricci. Il 18 giugno 1644 Ricci, rispondendo alla lettera con cui Torricelli aveva descritto e spiegato l'esperienza, pone tre obiezioni: nella prima si chiede se la colonna di mercurio sarebbe rimasta uguale anche chiudendo con un coperchio la bacinella, nella seconda chiede come mai il peso dell'aria che dovrebbe esercitarsi verso il basso, si eserciti in realtà in ogni direzione, nella terza, afferma che il mercurio nel tubo dovrebbe contrastare una quantità di aria pari al suo volume e pertanto gli sembra assurdo che la pressione di questa poca aria possa equilibrare quella del mercurio. Il 28 giugno 1644 Torricelli risponde a Ricci considerando i tre problemi posti. Alla prima obiezione controbatte dicendo che anche chiudendo con un coperchio la bacinella la colonna di mercurio non scenderà perché l'aria rimasta nella vaschetta avrà la stessa «condensazione» dell'esterna come, tagliando trasversalmente con un ferro un cilindro di lana compresso da un peso, la parte inferiore della lana, rimane compressa [6]. Nel rispondere alla seconda obiezione Torricelli enuncia quello che sarà il principio di Pascal: la pressione dell'aria si esercita in tutte le direzioni. Per il terzo problema Torricelli fa notare che il mercurio all'interno del vaso *confina col vacuo* e che l'atra superficie *confina con aria premuta da tante miglia di aria ammassata* ed è questa che provoca l'innalzamento del mercurio [8]. Dopo questa lettera Torricelli non interviene più sul tema della Pressione. Non è da escludere che il motivo sia la natura eretica del tema dell'esistenza del vuoto, legato, come abbiamo cercato di argomentare, al peso dell'aria.

Le vicende di Galileo consigliavano indubbiamente cautela.

Le conferme di Pascal, il barometro e la pompa pneumatica

Il lavoro di Torricelli aprì un grande dibattito scientifico in Europa. Come noto, Blaise Pascal ripeté l'esperienza anche con due lunghi tubi, uno riempito di vino e l'altro di acqua nel cortile di una vetreria di Rouen. Nel 1648 Périer, cognato di Pascal, utilizzò il dispositivo torricelliano con il mercurio sul Puy de Dôme, trovando che in montagna il livello di mercurio nel tubo è più basso rispetto a quello trovato a livello del mare, confermando così le previsioni di Torricelli. Pascal e Périer compresero inoltre che "misure" effettuate con il tubo

torricelliano erano in relazione non solo all'altitudine ma anche alle condizioni metereologiche. Fu Boyle nel 1667 a dare il nome di barometro o baroscopio al suddetto strumento in cui la vaschetta di mercurio era stata sostituita con un sifone [6]. La possibilità di creare il vuoto portò alla realizzazione della "macchina" che Otto von Guericke, ingegnere tedesco, costruì e utilizzò a Ratisbona nella spettacolare esperienza degli "emisferi di Magdeburgo". Fu Gaspar Schott nella sua *Mechanica hydraulico pneumatica del 1657* a chiamarla "pneumatica" [6]. La macchina era costituita da due recipienti uniti per il collo e muniti di rubinetti; il primo recipiente conteneva aria e il secondo era evacuato con uno stantuffo. Mettendo in comunicazione le due parti si riusciva a togliere aria dal recipiente che la conteneva. Tale strumento venne migliorato da Robert Boyle con la collaborazione del suo assistente Robert Hooke mediante un sistema cremagliera-ruota dentata che rendeva più facile il movimento dello stantuffo. Due rubinetti che si aprivano e si chiudevano alternativamente regolavano l'aspirazione e l'espulsione dell'aria.

La macchina pneumatica permise fare molti esperimenti coinvol-

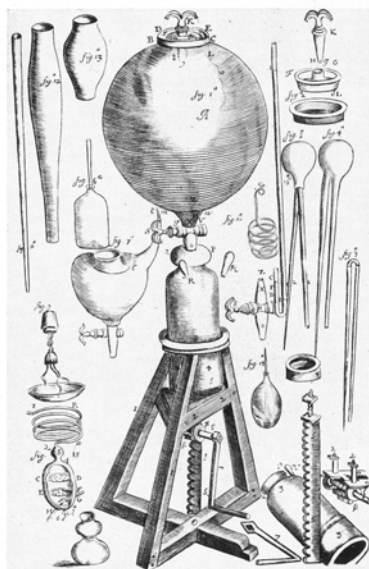


Fig. 1667. Nuova Macchina di Boyle, con raffigurazione di apparecchiature. Antiquaria del Nuovo esperimento di R. Boyle, con raffigurazione di apparecchiature.

Figura 2.

genti l'espansione e la compressione che portarono a considerare l'aria come un fluido elastico. Nel lavoro *Nuovi esperimenti sull'elasticità dell'aria* del 1660, Boyle riporta: la determinazione del peso dell'aria, la misura della rarefazione, introducendo nel recipiente da evacuare "un barometro", la dimostrazione che nei recipienti senza aria non si mantiene la combustione, non si propaga il suono, non funziona un sifone [6].

La legge di Boyle

Robert Boyle (1627–1691), scienziato che ha incarnato le scienze baconiane, è ricordato per le sue ricerche fisiche [3], chimiche [1], per la sua teoria corpuscolare [2]. Gli esperimenti sull'elasticità dell'aria, spiegati in chiave torricelliana, culminarono con la legge che porta il suo nome. Secondo Gliozzi, partendo dalla critica che il padre gesuita Francesco Lino faceva delle spiegazioni date da Boyle sui fenomeni riguardanti l'espansione dell'aria come quello delle vesciche flosce che si gonfiano in recipienti svuotati di aria, si possono ricostruire i passi che hanno portato a definire il rapporto di inversa proporzionalità fra pressione e volume dell'aria a temperatura costante. Francesco Lino (1595–1675), sosteneva che il fenomeno barometrico e l'aspirazione dell'acqua nelle pompe era attribuibile a particolari particelle uncinatate d'aria e di acqua che si attaccavano le une alle altre. Nel 1660 in *De esperimento argenti vivi tubo vitreo inclusi*, padre Lino osservava che se si immerge nel mercurio un tubo aperto alle due estremità, e si chiude l'estremo superiore con un dito e si estrae parzialmente il tubo dal mercurio, si sente un'attrazione del polpastrello verso l'interno del tubo. Questa attrazione era attribuibile a *funicoli*, ossia fili invisibili di materia attaccati da una parte al polpastrello e dall'altra alla colonna di mercurio. Boyle scrive nel 1662 una *Defence against Linus (Difesa contro Lino)* in cui descrive la famosa esperienza del tubo ricurvo:

Noi allora ci sforzeremo di dimostrare, con esperimenti appositamente fatti, che l'elasticità dell'aria è capace di operare molto di più di quanto ci è necessario di attribuirle per spiegare il fenomeno torricelliano [...] Prendemmo un lungo tubo di vetro che da una mano capace e con l'aiuto di una lampada fu in tal misura piegato in fondo che la parte rivolta in su era quasi parallela al resto del tubo e l'oreificio di questo braccio più corto

era ermeticamente chiuso, mentre la sua lunghezza era divisa in pollici (ciascuno dei quali era diviso in otto parti) mediante una striscia di carta che contenendo quelle divisioni era accuratamente incollata lungo il braccio [6].

Con il tubo piegato a U, dopo aver messo la quantità di mercurio necessaria a bloccare il passaggio dell'aria e tale che il livello fosse uguale nei due bracci, aumentando la quantità di mercurio, il volume di aria diminuiva nel braccio corto, poiché il mercurio saliva molto di più nel braccio più lungo. Quando il volume dell'aria era ridotto a metà la differenza di livello nei due rami era uguale all'altezza della colonna barometrica, quando il volume dell'aria era ridotto a un terzo, la differenza diventava doppia e così via. L'esperienza venne ripetuta da Townley che comprese appieno l'importanza della legge in relazione all'elasticità dell'aria, tanto che Boyle la pubblicò come "legge di Townley". Successivamente Boyle verificò con il barometro a lunga vaschetta tale legge per pressioni minori di quella atmosferica, concludendo che *l'elasticità dell'aria si comporta in ragione inversa del volume* [6].

Conclusioni

La storia della materialità dell'aria qui tracciata, pone le basi per un itinerario didattico che può proseguire con lo studio delle "arie" diverse dall'aria atmosferica e il lavoro di Lavoisier. Tale percorso utilizza *la storia* che qui abbiamo raccontato per cogliere gli aspetti essenziali, i nodi epistemologici che hanno portato ai concetti di peso, di pressione, di volume dell'aria. L'esperimento di Torricelli viene visto nella sua problematicità storica e questo aiuta gli studenti a capirne il significato visto che l'interpretazione spontanea che ne danno gli studenti è spesso riconducibile all'*horror vacui*. Immaginare di ripetere l'esperienza con tubi contenenti liquidi diversi dal mercurio, come fece Pascal, mettere in relazione la densità con l'altezza diversa raggiunta, permette di chiarire l'equilibrio che si stabilisce fra pressione dell'aria e pressione del liquido. Il funzionamento della pompa pneumatica e la legge di Boyle permettono di capire meglio gli effetti dell'elasticità dell'aria. Tutto questo pone le basi per utilizzare il "bagno pneumatico", un cilindro pieno di acqua tappato e rovesciato in modo che l'acqua non

scenda in una bacinella contenente acqua, che servirà per raccogliere arie diverse dall'aria atmosferica [5]. 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] ABBRI F., 1984, *Le terre, l'acqua, le arie*, Bologna, Il Mulino, 86–88.
- [2] —, 2000, *Le origini della chimica moderna*, in *Dalla rivoluzione scientifica all'età dei lumi 1*, a cura di P. Rossi, Milano, TEA, (358–361).
- [3] BOYLE R., *Nuovi esperimenti fisico-meccanici*, in *Opere*, Torino, UTET.
- [4] CAVALLINI G., 1995, *La formazione dei concetti scientifici*, Firenze, La Nuova Italia, II–29.
- [5] FIORENTINI C., AQUILINI E., COLOMBI D., TESTONI A., 2007, *Leggere il mondo oltre le apparenze*, Roma, Armando, 96–125, 126–130.
- [6] GLIOZZI M., GIUA M., 1962, *Storia delle scienze*, Torino, UTET, 7, 96, 97,99,100,105,102, 551, 105, 108–110.
- [7] PASCAL B., 1968, *Trattato sull'equilibrio dei liquidi*, Torino, Boringhieri, 84.
- [8] TOSCANO F., *L'erede di Galileo*, 2008, Milano, Sironi Editore, 51, 52, 58–59, 61–63, 129, 134–135, 146–148.

Eleonora Aquilini
Liceo Artistico "F.Russoli" di Pisa
Università di Pisa
ele.aquilini@tin.it